裳華房　　ポピュラー・サイエンス　258

われらの有人宇宙船

―日本独自の宇宙輸送システム「ふじ」―

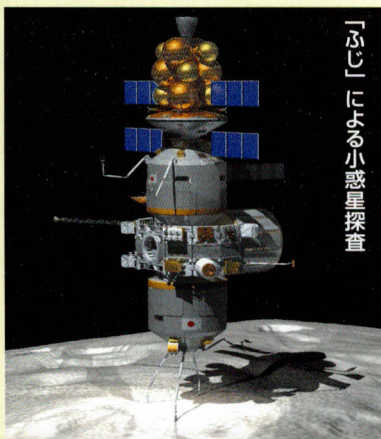
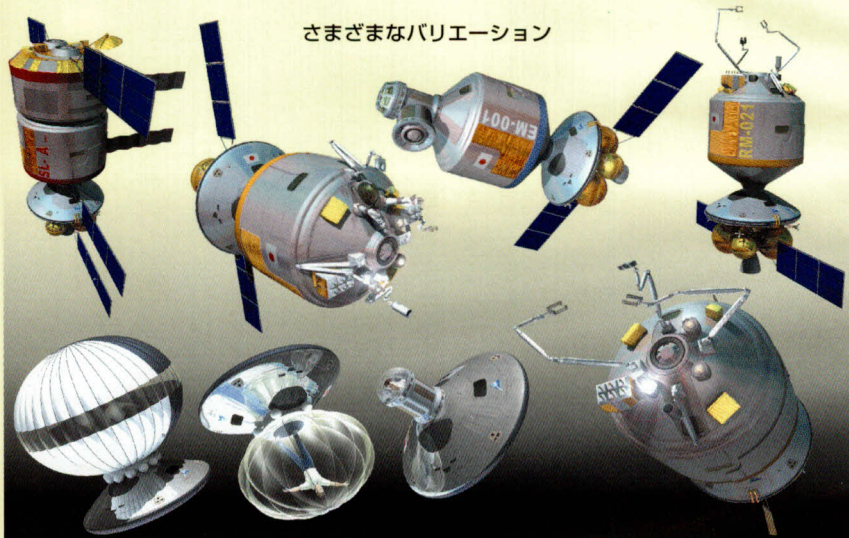
松浦　晋也　著

ポピュラー・サイエンス 258
われらの有人宇宙船
日本独自の宇宙輸送システム「ふじ」
松浦　晋也　著
裳華房

「自分が宇宙に行きたいと思うのならば，自分で自分の乗る宇宙船をつくるべきだ」

2001年の冬に公表されるや，宇宙開発に関心をもつ多くの人に大きなインパクトを与えた有人宇宙船「ふじ」構想．「ふじ」は，現在すでにある技術を使って，一般の人々でも宇宙へ行くことができるように目指したカプセル型宇宙船です．

この日本独自の有人宇宙輸送システムの検討に加わった著者が，自分たちの手で自分たちのための有人宇宙船をつくるための指針をやさしく解説します．「ふじ」構想の概略から，有人宇宙飛行の歴史をたどりつつ，スペースシャトルに代表される再利用型の有人宇宙船の問題点を検証し，今後の日本の宇宙開発はどうあるべきかを考えます．

装丁／吉永聖児
表カバーイラスト／撫荒武吉
裏カバーイラスト／小林伸光

EM-001
SPACE VIEW CORP.

日本独自の有人宇宙船構想「ふじ」

さまざまなバリエーション

EM-001

RM-021

（口絵イラスト：小林伸光）

われらの有人宇宙船

——日本独自の宇宙輸送システム「ふじ」——

松浦 晋也 著

裳華房

まえがき

―有人宇宙輸送システムの最適解は？―

自転車の乗り方を覚えたときのことを思い出してみよう．練習の方法はいろいろあるけれども，いずれの方法も「まず自分で乗る」ということから始まっている．当たり前の話だ．自分で自転車に乗らずに，見ているだけで自転車に乗れるようになるはずもない．

そう，「自分でやる」というのはとても基本的なことで，そしてものすごく大切なことだ．自分の頭で考える．自分の手を動かして物をつくる．自分の脚で歩いてみる――そうやって蓄積した経験こそが，何物にも代えがたい未来につながる宝である．

だから言ってしまおう．自分が宇宙に行きたいと思うのならば，自分で自分の乗る宇宙船をつくるべきなのだ．他人に宇宙に連れていってもらうのと，自分が望んで苦労して行くのとでは，経験の質として天地ほどの違いがある．

宇宙船ぐらい大きなものになると，一人ではつくれない．だから「より大きな“自分”と感じられる集団」で事に当たる必要がある．それは自分の信ずる友人の集まりかも知れないし，所属する学校や会社かも知れない．一番大きな“自分”はとりあえず国家だろうか．

そして，日本という国の宇宙開発の技術レベルは，すでにほかの国から何かを学ぶという段階を過ぎている．

2001 年から，私は宇宙開発事業団（現 宇宙航空研究開発機構）・先端ミッション研究センターの野田篤司氏（所属は当時）の有人宇

宙船構想の検討に参加してきた．野田氏の構想は「ふじ」という．「ふじ」は，現代の技術を最大限に利用して，カプセル型有人宇宙船に新たな息吹を吹き込もうとする試みだ．

現在の日本の技術力ならば，8年間の時間と相応の開発予算をかければ，技術的に妥当で実用的なカプセル型の有人宇宙船をつくることができる．それは地球近傍のみならず，少々の改良と機能拡張で，月や小惑星までも往復することができる．“使い捨て”だからといって，そのコストが非常識に高くなるということもない．その宇宙船に乗るための予算は，航空機のチケットよりはるかに高いが，宝クジのような手段であれば，けっして庶民に手の届かない金額ではない．

これまでこの話をすると，すぐに「スペースシャトルみたいに翼で帰ってきて，何度も使える宇宙船の方が進んだ形式なのではないのか」と言われたものだった．しかし，2003年2月1日，スペースシャトル「コロンビア」の空中分解事故が起きた．もはや「スペースシャトルのような形式こそが未来の宇宙船のあるべき姿」と声高に主張する人はいないだろう．少なくとも，もう一度先入観を捨てて，いろいろと考え直す必要があることに異論はないはずだ．

「コロンビア」の事故は，1986年1月のスペースシャトル「チャレンジャー」爆発事故から17年目．スペースシャトルの運用があまり話題にならなくなったタイミングで事故は起きた．この文章を書いている2003年6月末現在，事故調査が続いている．アメリカ航空宇宙局（NASA）は早ければ，2004年3月にもスペースシャトルの運用を再開するとしている．チャレンジャーのときは2年8か月も運用を停止したことを考えれば，素早い再起を図っているといえるだろう．(2005年7月，事故後初のフライト「STS-114」が実施された．しかし，打ち上げ中に外部タンク断熱材がはがれるト

ラブルが発生して，その後の運行は再度中断となった．2006年4月現在，次の飛行は2006年7月の予定）

しかし，事故の影響は甚大だ．残るスペースシャトルのオービター（機体）は「ディスカバリー」「アトランティス」「エンデバー」の3機．代替の機体を製造しようにも，2000億円を超える建造費の支出は困難だし，かつてスペースシャトルを製造したカリフォルニア州パームデールの旧ロックウェル・インターナショナル社（現在はボーイング社）の工場は，1992年に「エンデバー」が完成した直後に製造ラインを閉鎖し，製造に携わった人々は四散してしまっている．今後，スペースシャトルの運用は，現存する3機のみで行わなければならない．

また，現在軌道上で建設途中の国際宇宙ステーション（ISS）は，組み立てをスペースシャトルに依存している．ISSは本来，コロンブスのアメリカ到達500周年の1992年には完成している予定だった．それが計画の肥大と予算不足，国際協力の足並みを揃(そろ)えるためのあれこれでどんどん予定が遅れて，「コロンビア」が事故を起こす直前は2007年に完成することとなっていた．「コロンビア」の事故がさらに完成を遅らせることは間違いない．

日本は有人宇宙活動を，ISSとスペースシャトルに完全に依存している．ISSの日本モジュール「きぼう」は，2006年から2007年にかけて打ち上げられることになっていた．スペースシャトルの事故とISSの完成遅延は，すなわち日本の有人宇宙活動の遅延をも意味している．

問題は二つだ．「スペースシャトルは本当に有人宇宙輸送システムの最適解なのか」，そして「日本は今後ともスペースシャトルに依存した有人宇宙計画を続けるのか」ということである．

考えてみれば1960年代，米ソは宇宙開発を激しく競い，それぞ

れ 3 種類の有人宇宙船を開発した．そして，1970 年代いっぱいをかけて開発したスペースシャトルは，1981 年から運用を開始した．その後 20 年以上，新しい有人宇宙船は開発されていない．これはとても不自然な状況ではないだろうか．その不自然な状況の中で，20 年以上前の設計のスペースシャトルに，今後 10 年以上依存しつづけることを前提にした，現在の日本の有人宇宙計画もまた，ひどく不自然なものではないだろうか．

本書の結論は以下の通りである．

・スペースシャトルに代表される再利用型有人宇宙輸送システムは，理想であってもけっして現実的ではなく，今のところ定常運用には無理がありすぎる．
・現在の技術水準を前提にするならば，「アポロ」「ソユーズ」のような使い捨てのカプセル型有人宇宙船が，より妥当な有人宇宙輸送システムである．
・日本は，「アポロ」以降の 30 年で大きく進歩したエレクトロニクスや材料技術を駆使して独自のカプセル型宇宙船を開発し，今後の有人宇宙開発の基礎とするべきである．

本書は，我々が自分の手で自分のための宇宙船をつくるための指針をやさしく解説する．まず，「ふじ」構想について説明しよう．そして，有人宇宙飛行の歴史をたどりつつ，スペースシャトルに代表される再利用型有人宇宙輸送システムの問題点を検証し，今後，日本がどうするべきかを考えていくことにする．

松浦晋也

目　次

第1章　日本独自の有人宇宙船構想「ふじ」

第2章　有人宇宙船ア・ラ・カルト —宇宙飛行の歴史—

第3章　カプセル型宇宙船に新たな展開を —さまざまな技術で問題点を克服—

第4章 スペースシャトル，その高コスト構造

第5章 ロケット・エンジンの限界 ―届かない完全再利用型の夢―

第6章　大気中の酸素を使え —スペースプレーンは希望になるか—

第7章　多段式完全再利用型の可能性について，そして結論

第8章　宇宙ステーションと「ふじ」

第9章 宇宙を巡る産業構造

第10章 オープンアーキテクチャーで産業活性化を

第11章 われらの政府と宇宙に行くための投資システム

本文イラスト：小林伸光，撫荒武吉，田巻久雄

第1章　日本独自の有人宇宙船構想「ふじ」

1・1　短期間・低コストで開発可能な有人宇宙船「ふじ」

有人宇宙船「ふじ」は，宇宙開発事業団（NASDA，現JAXA）先端ミッション研究センターの野田篤司主任開発部員を中心としたグループが提案している構想だ．2001年の春から秋にかけて構想の検討が行われ，2001年冬に概要が一般公開された．

検討には，NASDAや東京大学の宇宙開発の専門家だけではなく，作家やライター，イラストレーターなども参加して構想を作成した．筆者もその末席に連なり，検討に加わった一人だ．

「ふじ」は技術的な提案であり，国の正式な開発計画ではない．実現に向けては，さらなる技術的な検討と，そして何よりも有人宇宙飛行への国民の支持が必要になる．

「ふじ」のメリットは，今すでに存在する技術をうまく組み合わせたものなので，新たな技術開発をする必要がなく，短期間かつ低コストに実機を開発できる，ということだ．まだまだ研究しなければ開発にかかれそうもない，翼をもち再利用できるスペースプレーンのような宇宙船とはわけが違う．今すぐ開発にかかれて，8年間で完成させることができるのである．

1・2　宇宙船としての最低限の能力をもつコア・モジュール

まず最初に，「ふじ」構想の詳細をみていくことにしよう．

図1-1が，「ふじ」の中核となるコア・モジュールだ．直径約3.7 mの円錐形状をしており，軌道上で姿勢を制御するスラスターという小さな推力のロケット・エンジンと，軌道上から地上に帰還す

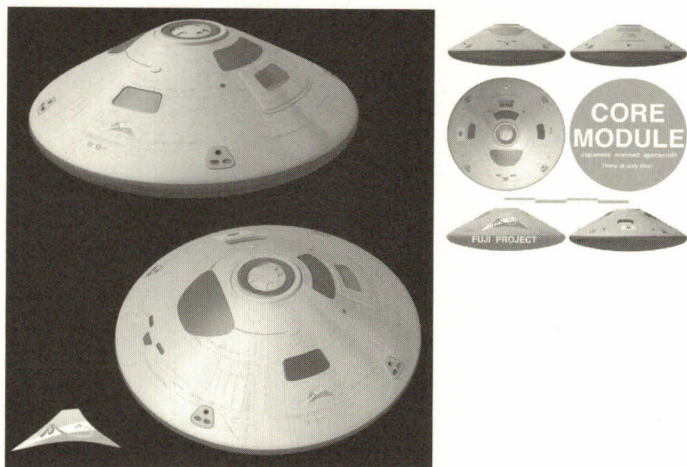



図 1-1　「ふじ」の中核となるコア・モジュール（イラスト：小林伸光）

るための逆噴射用ロケット・エンジンをもつ．搭乗定員は3人で，内部には軌道上に24時間の滞在を可能にする空気や水，電池などの物資を搭載する．この構想では今のところ，全備質量は約3t以下にしたい目論見だ．目標は2.5t，できれば2tにならないかと検討が続けられているところだ．

コア・モジュールは，「ふじ」というシステムの核となる存在だが，同時に単体が宇宙船として機能するようにできている．

「ふじ」の具体的なイメージをつかむために，自分のいる部屋の真ん中に寝ころんでみよう．

そこが4畳半の部屋ならば，部屋の対角線を直径とする円を想像してほしい．それがほぼ「ふじ」の直径となる．ただし，4畳半が内接する円だから，広さとしては6畳間よりも広くなる．次に天井を見つめ，そこまでの高さがある円錐を思い浮かべよう．子どものころの“ごっこ遊び”の要領だ．部屋の真ん中に寝ころんだあなた

は，打ち上げ前の「ふじ」に搭乗している．そこで実感する大きさが，地上で感じる「ふじ」の大きさである．24 時間乗りっぱなしの乗り物としては，けっして悪くない居住性だ．

図 1-2 が「ふじ」コア・モジュールの飛行プロファイル図だ．開発が進んで，たくさんの「ふじ」が打ち上げられるようになれば，さまざまな軌道へ打ち上げることになるだろうが，ここでは，一番初めの試験飛行で考えられている，種子島から打ち上げて種子島近海に帰還するという飛行を示した．

打ち上げに使うロケットは，日本の H-ⅡA ロケットを想定しているが，じつのところ，質量 3 t の「ふじ」を地球にまわる軌道にもち上げられる能力のあるロケットなら何でもよい．アメリカや欧州のロケットはもちろんのこと，ロシアや中国のロケットでも構わない．「ふじ」はなるべく，どんなロケットでも打ち上げられるようにすることになっている．

最初の試験打ち上げで，H-ⅡA ロケットの先端に乗った「ふじ」コア・モジュールは，種子島宇宙センターから地球を 1 時間半で 1 周する地球低軌道に打ち上げられる．軌道の高さは 200 km，軌道と赤道面とのなす傾きの角度は，種子島の緯度と同じ 30 度である．この軌道は，種子島から一番簡単に打ち上げられる軌道だ．

地球は約 24 時間の周期で自転している．だから，「ふじ」が 1 時間半をかけて地球を周回するたびに，真下にくる地域がずれていく．打ち上げから 24 時間，地球を 15 回まわったところで，真下に種子島がくる．帰還のチャンスだ．逆噴射をした「ふじ」は大気圏に再突入して減速，最後にパラシュート（パラフォイル）を開いて着水する．

「ふじ」は，地球に帰還するときに，高速でぶつかる大気によって加熱される．スペースシャトルは，もっとも高温になる機首先端や翼の前縁に強化カーボン－カーボン材，次いで高温になる胴体や

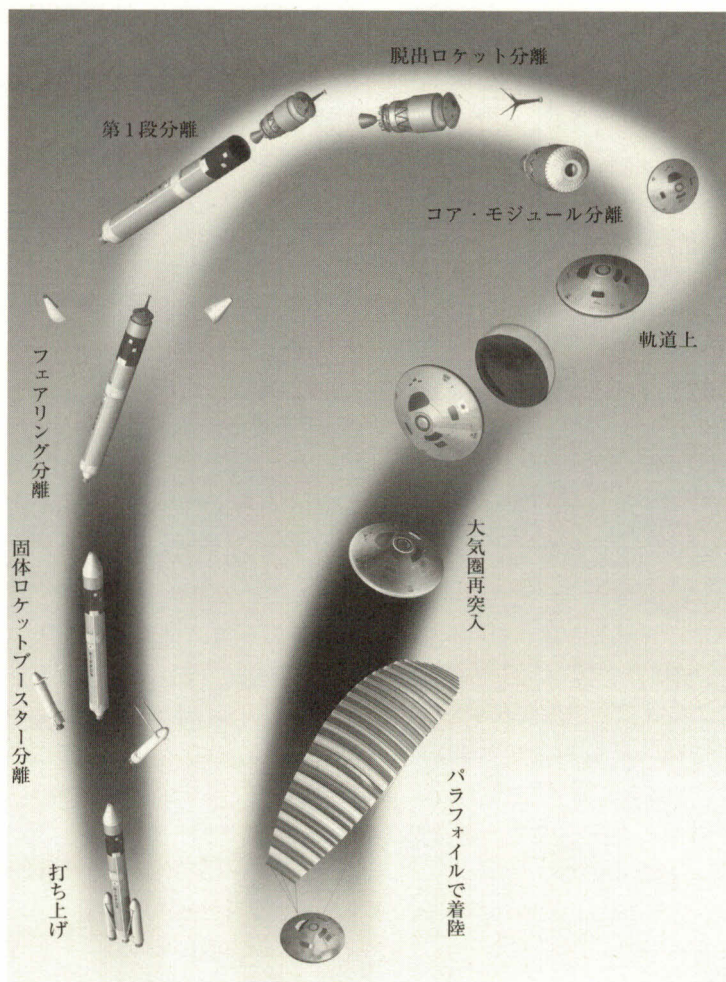



図1-2　「ふじ」コア・モジュールの飛行プロファイル図
（イラスト：小林伸光）

翼の下面に，黒くコーティングを施したシリカ（酸化ケイ素）系の耐熱タイル，やや温度が低い翼上面などの部分に白色のシリカ系タイル，胴体側面のようにあまり温度が上昇しない部分は，耐熱合成繊維「ノーメックス」のフェルトを使用している．

これに対して「ふじ」は，アブレーター（助融材）というものを使う．補強用のガラス繊維に炭素系樹脂を浸潤させたものだ．カプセル型宇宙船ではごく当たり前に使われているもので，炭素系樹脂が熱によって蒸発しながら，その気化熱によって温度を下げると同時に，発生するガスが断熱層の役割を果たす．もちろん1回しか使えないが，「ふじ」そのものが1回しか使わないので問題ない．かなり丈夫でスペースシャトルのタイルのように脆（もろ）くないし，耐熱性は十分にあり，安全のためのマージンを大きくとることができる．

1・3 モジュールのドッキングで機能を拡張

「ふじ」のコア・モジュールは，24時間の宇宙滞在しかできない．これでは滞在時間が短すぎる．現在，スペースシャトルは最長で14日18時間の宇宙滞在をこなしているし，かつての宇宙ステーション「ミール」や国際宇宙ステーションでは，何か月もの連続宇宙滞在を実施している．ちなみに宇宙滞在の世界記録は，ロシアの医師ワレリー・V・ポリャコフ博士が1994年から1995年にかけて「ミール」で達成した437日18時間である．

そこまではいかないにしても，「ふじ」にもある程度連続して宇宙に滞在する設備がほしい．できれば，地球をまわる軌道から離れるためには強力なエンジンも必要だろう．この2個があれば，月や小惑星へ行って帰ってくることもできる．

「ふじ」はコア・モジュールに，拡張モジュールと推進モジュールを取り付けることができる．図1-3が「ふじ」標準型，スタンダード・バージョンだ．

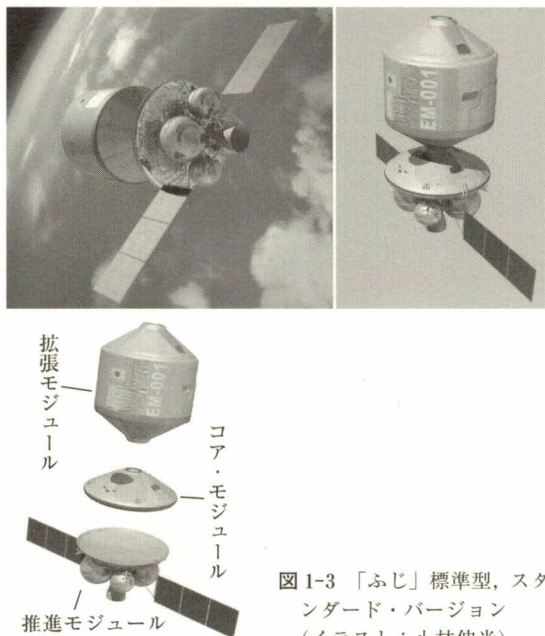



図 1-3　「ふじ」標準型，スタンダード・バージョン（イラスト：小林伸光）

コア・モジュールの前には居住のための拡張モジュールが結合され，後ろには軌道変更用のエンジンと太陽電池パドルをもつ推進モジュールが付く．この状態で「ふじ」は１か月の宇宙滞在が可能になる．月に行って帰ってくるのに十分な時間だ．

図 1-4 が，「ふじ」標準型の飛行プロファイル図だ．といっても，基本的にはコア・モジュールの飛行プロファイルと大きく変わることはない．宇宙に長期間滞在し，その間に場合によっては，エンジンを吹かして軌道を変えるという操作を行うところが違う程度だ．

地球に帰還するときには，拡張モジュールと推進モジュールを切り離して捨てる．捨てられたモジュールは，大気圏に突入して燃え尽きる．コア・モジュールだけが地球に帰ってくるわけである．

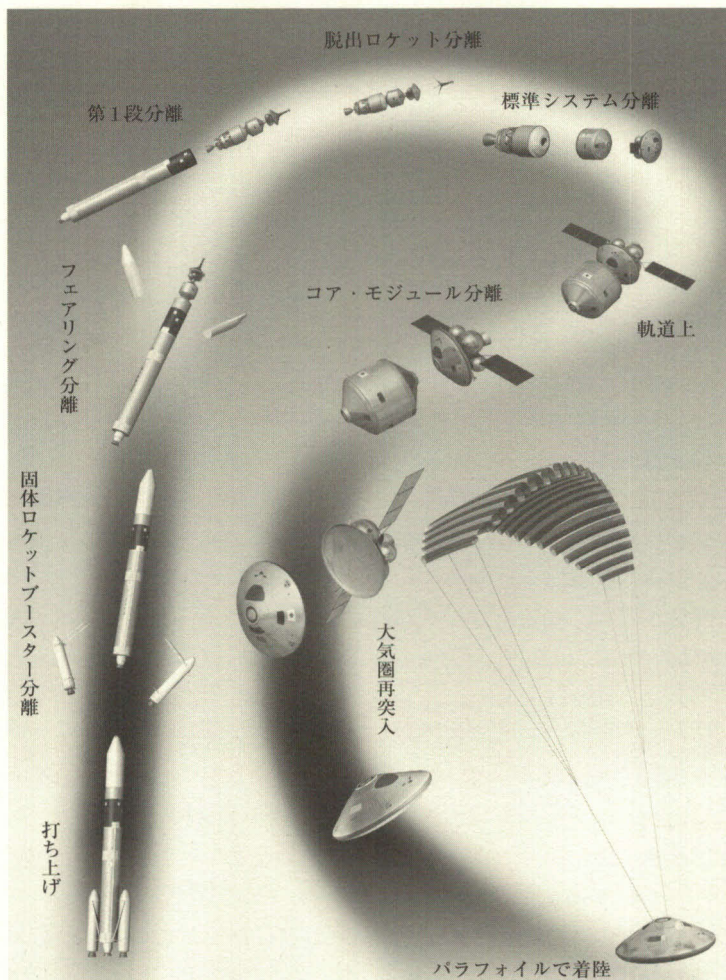



図 1-4　「ふじ」標準型の飛行プロファイル図（イラスト：小林伸光）

1・4　コストダウンで宇宙観光を可能に

ここまでがオリジナルの「ふじ」構想だ．当然その先も検討されており，まずは，コア・モジュールの乗員を5名にして，低コスト化を図った宇宙観光用「ふじ」が候補に上がった．

宇宙観光用のコア・モジュールは，形状は標準型コア・モジュールそのままだ．ただし，内部にはパイロット1名と旅客4名が搭乗する．検討では，24時間の宇宙飛行にかかる経費を1人2億円程度に押さえられる見込みが算出された．現在，ロシア宇宙庁が行っている国際宇宙ステーションへの観光飛行は，1週間で2000万ドル（約26億円）．宇宙での滞在時間が短いという欠点はあるものの，宇宙観光用「ふじ」が，宇宙へ行くための敷居を大きく引き下げることは間違いない．

宇宙観光用コア・モジュールの飛行では，身体的に楽なフライトを徹底的に追求することになるだろう．これまでの検討結果を利用して，宇宙観光用「ふじ」コア・モジュールでの飛行手順を，なるべく具体的に描写してみよう．

事前準備は，健康診断と，同時に搭乗する5名による緊急時の避難訓練となるだろう．安全な飛行のために，これだけはどうしても必要だ．乗客は，地上，打ち上げ時，軌道上，帰還時，不時着後のすべての場合に取るべき行動を覚えることになる．

宇宙観光飛行に限らず，「ふじ」の操縦システムは，可能な限りの自動化と地上からの遠隔操縦が可能な設計を目指している．だから，搭乗するパイロットの役割は，飛行中の乗客のケアと，すべての非常手段が使えなくなった場合の操縦，そして非常時にリーダーとなり乗客のパニックを防ぎ，安全に地上に帰還させることとなる．

風邪などの病気を防ぐために，打ち上げ1週間前ぐらいから乗客は隔離生活に入る．といっても，無菌室に入るというような物々しいものではなく，面会を制限され，決められた食事を食べて，生活

のリズムを打ち上げに向けて合わせていくというものになるはずだ．24 時間の飛行なので，事前の食事を調整することで，軌道上での便通を避けることになるだろう．

打ち上げに使う予定の H-ⅡA ロケットは，打ち上げ 8 時間前に機体組立棟から射点に移動する．組立棟で搭乗するか，射点に乗り組むための設備を新設するかはまだ決まっていない．

そして打ち上げ．打ち上げ後 30 分ほどで「ふじ」は軌道に到達する．無重力状態に入ると，一部の人は“宇宙酔い”を起こすことが知られている．宇宙酔いは，ひどい場合でも 3～4 日でおさまるが，宇宙観光用コア・モジュールの飛行時間は 24 時間しかない．宇宙酔いをどうやって防ぎ，快適な 24 時間の飛行を実現するかは，今後の大きな研究課題だ．

これまでの検討では，宇宙観光の目玉として二つのオプションが検討されている．

一つはキューポラ，全天を見渡せる見晴らし窓だ（図 1-5）．「ふじ」コア・モジュールの前面のドッキングポートに取り付け，軌道上で安全を確認してからハッチを開いて使用する．夜の側に入れば窓を地球と反対側に向けて満天の星空を楽しみ，昼の側に入れば窓を地球に向けて，移り変わる地表の表情を眺めることになる．

もう一つのオプションは，風船のように膨らますインフレータブル型の簡易居住モジュールだ（図 1-6）．キューポラと同じくドッキングポートに取り付けておき，軌道上で空気を吹き込んで膨らまし，安全を確認してからハッチを開けて使用する．内圧に対してもっとも強い構造といわれるカボチャ型をしており，コア・モジュールよりもはるかに広い空間を確保する．こちらのお楽しみは景色ではなく，無重力環境そのものだ．内部には手すりや足場を用意しておいて，無重力下でのダンスを楽しむのもよいだろうし，ハッチを閉じて 1 人宇宙と向き合う時間をつくるというのでもよい．検討では，

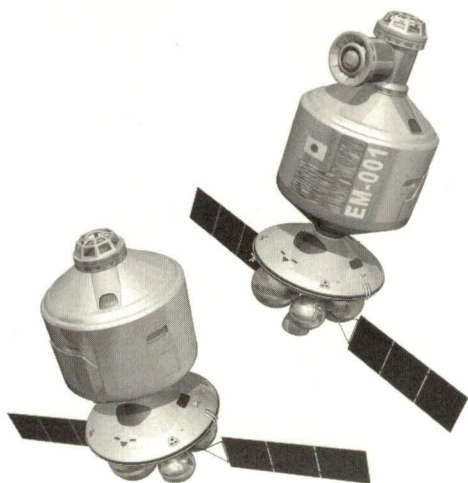



図 1-5　キューポラを装着した「ふじ」
（イラスト：小林伸光）

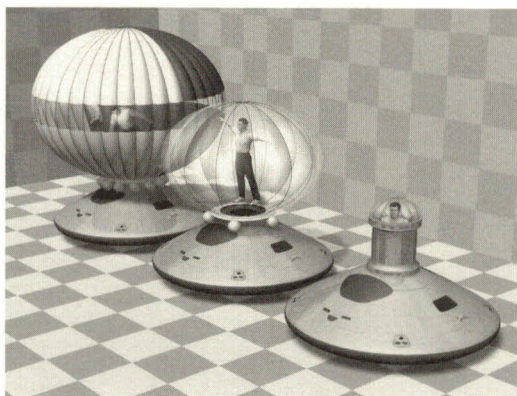



図 1-6　インフレータブル型の簡易居住モジュールの例
（イラスト：小林伸光）

新婚旅行ならば，2人だけの時間をこの簡易居住モジュールでつくれるのではないか，という意見も出ている．

地球を15周，24時間の飛行を楽しんだ後，宇宙観光用「ふじ」コア・モジュールは逆噴射を行い，種子島近海に着水する．観光飛行開始までに十分な運用実績を積むことができたならば，海ではなく地上にふわりと帰還することになるだろう(3・3節参照)．

1・5　モジュールのバリエーションを増やし，さまざまな用途に適応

さらに，未来への発展型も考えられている．

「ふじ」最大の魅力は，将来に向けた拡張性の高さにあるといっても過言ではない．拡張モジュールも推進モジュールも，使い捨てということを逆手にとって，どんどんバリエーションを増やしていくのだ．

「ふじ」の検討に当たっては，十分な電力を発生する電源と，放熱機構を備えた宇宙実験室モジュール（図1-7）や，先端にマニピュレーターハンドをもつ宇宙作業ロボット型モジュール（図1-8）などが考えられた．もちろん，これらは運用を続けていくなかで改良を重ねていくのである．“使い捨て”の利点を活かして，モジュールを進化させていくわけだ．「ふじ」構想では，「使いつづけながら技術を磨(みが)き，さらに新しい技術を手に入れる」ことが大きな意味をもっている．カプセルが完成したら終わりではなく，継続的にいろいろな試みを続け，宇宙で生きていくための技術を少しずつ学んでいくのである．

宇宙実験室モジュールは，使い捨てにして危険物を扱う実験を行ってもよいし，場合によっては太陽電池パドルと姿勢制御システムを搭載して，人間が地表に帰還した後も実験を続ける宇宙無人実験室として使ってもよいだろう．そこに別の「ふじ」で人が再度訪れる

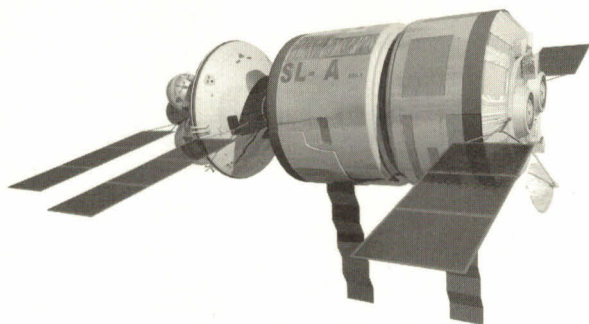



図1-7　放熱機構を備えた宇宙実験室モジュールを装備した「ふじ」（イラスト：小林伸光）

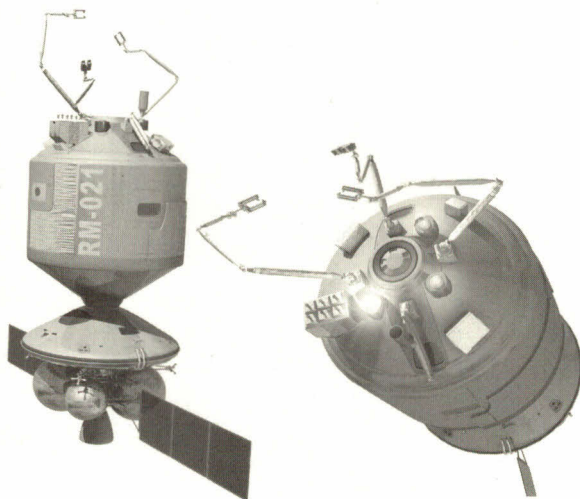



図1-8　マニピュレーターハンドをもつ宇宙作業ロボット型モジュールを装備した「ふじ」（イラスト：小林伸光）

ならば，小さいながら立派な宇宙ステーションである．「ふじ」の開発と運用は，自然に日本独自の宇宙ステーションの開発へとつながってゆく．

さらに，打ち上げた拡張モジュールをどんどん結合して，大きな宇宙ステーションをつくり上げることもできるだろう(8・7節参照)．この場合，モジュール結合部の強度や，各部の寿命，空気や水の循環，廃熱（内部にこもる熱をどう捨てるか）など，解決しなければならない課題は多いだろうが，それでも打ち上げの度にモジュールを連結していき，場合によっては更新していくというアイディアは悪くない．生物のように成長し新陳代謝を行う宇宙ステーションだ．

「ふじ」に接続するモジュールは，推進モジュールと拡張モジュールだけである必要はない．必要に応じて，科学観測機器を搭載したプラットフォームを結合して打ち上げてもよいだろう．また，推進モジュールも１種類ではなく，より能力の高いものを開発することを考えてもよい．

図 1-9 は，地球近傍にある小惑星の探査を行うための「ふじ」構

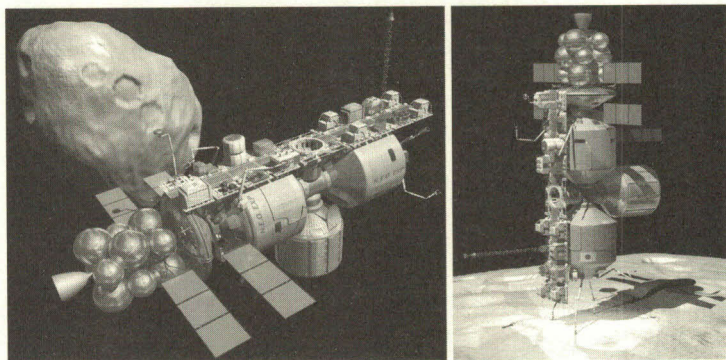



図 1-9　地球近傍の小惑星探査を行うための「ふじ」
（イラスト：小林伸光）

想だ．2回に分けて打ち上げられたモジュールは，軌道上で結合されて1機の宇宙船に組み上げられる．その上で，地球の近くまでやってくる小惑星を有人で探査する．

地球近傍の小惑星探査の実施は，必要なエネルギー量という点で，月に着陸して帰ってくるよりもはるかに容易である．小惑星の重力は月よりもはるかに小さいので，表面に降りてまた離れるのにエネルギーがほとんど必要ないからだ．ただし，その往復にはだいたい1年かかる．地球から直接の支援が受けられない1年間の宇宙航行となるとかなりの難事業だが，すでにロシアでは，「ミール」で1年以上の滞在が実際に行われている．だから，有人小惑星探査もけっして不可能なことではない．

このように，最初に開発する「ふじ」コア・モジュールは，3人の人間が24時間宇宙に滞在できるだけだが，その先にある可能性は非常に大きい．最初から大きな目標を目指すのではなく，まずは小さな種を蒔(ま)いて大きく育てていく――これが「ふじ」の方法論だ．少しかたい表現をするなら，「最小限のシステムを早いターンアラウンドで繰り返し，技術開発を推進しつつ，次のステップに必要なノウハウを蓄積する」ということになろうか．

こうすれば，最初から高すぎる目標を設定して長期に渡る悪戦苦闘のあげく挫折，というような事態を避けることができる．また，計画の途中に小さな目標をいくつも設定することで，開発に携わる技術者のモチベーションを高めていくと同時に，目標達成の過程で若手技術者を鍛(きた)えて，次世代に技術を継続していくこともできるようになる．

「ふじ」構想は，「日本独自の技術で日本人を宇宙に送ったら満足」などという小さなものではない．ごく普通の人が宇宙に出ていって生活空間を築くようになり，さらには月へ，火星へ，外惑星へ，恒

星間空間へ，銀河系外空間へ，とはるかに拡がる宇宙への最初の小さな，しかし確実なステップとなることを目指している．

「ふじ」は目的ではない．宇宙へ出ていくための方法論なのである．

第2章　有人宇宙船ア・ラ・カルト
—宇宙飛行の歴史—

「ふじ」構想は，かつて「アポロ」宇宙船などに使われたカプセル型の宇宙船の現代版リメイクだ．

一方，現在アメリカが運用しているスペースシャトルは，翼をもっており機体を何度も利用する．どうも「ふじ」よりも進んでいるように思える．

しかし，本当にカプセル型宇宙船が古くさい時代遅れのものかどうかというのは，かなり検討の必要がある事柄だ．本当にカプセル型宇宙船が時代遅れの形式で，スペースシャトルのような翼をもつ宇宙船がこれからのものなのか．よくよく考えなくてはいけない．

「ふじ」の性格を理解するためには，アメリカと旧ソ連が開発した宇宙船について，少々の知識をもっておくと便利だ．もちろん，技術というのは社会的な状況と切り離してはあり得ないから，宇宙船について知ることは，有人宇宙開発の歴史を知ることにほかならない．

2・1　熾烈な米ソの競争が宇宙船を進歩させた

原爆とミサイルで米ソが世界を二分していた1957年10月4日，ソ連は突如として，世界初の人工衛星「スプートニク1号」を打ち上げた．これは第二次世界大戦後，世界のリーダーを自負していたアメリカにとって，科学技術の分野でソ連に後れをとったことを意味した．さらには，宇宙に人工物体を打ち上げ可能ということは，モスクワから直接ワシントンに核ミサイルを撃ち込むこともできる

ことにほかならなかった．

アメリカは戦慄（せんりつ）した．

ソ連は同年 11 月 3 日，「スプートニク 2 号」を打ち上げた．「スプートニク 1 号」は，信号音を発信するだけの“宇宙のビーコン”だったが，「スプートニク 2 号」は重量 508 kg，中には雌のライカ犬が乗せられていた．彼女は大気圏を飛び出した最初の動物となり，同時に宇宙で死んだ最初の動物となった．「スプートニク 2 号」には再突入システムが装備されていなかったのだ．

また，初めて宇宙に行き生還した生物も，やはりライカ犬だった．1960 年 8 月 20 日，「ストレルカ」と「ベルカ」という 2 匹のイヌを乗せた「スプートニク 5 号」は，24 時間地球をまわり，無事生還したのだ．イヌを乗せるということは，いずれ人間を乗せるということにほかならなかった．

1961 年 4 月 12 日，当時 27 歳のユーリ・A・ガガーリン空軍少佐は，「ヴォストーク 1 号」で最初に宇宙へ飛んだ人間となる．世界初の宇宙飛行は 1 時間 49 分という短いものだった．これがカプセル型の有人宇宙船の始まりである．

図 2-1 に「ふじ」構想と，これまでに開発されたカプセル型宇宙船を示す．——アメリカの「マーキュリー」「ジェミニ」「アポロ」，そしてロシアの「ヴォストーク」「ヴォスホート」「ソユーズ」の一覧表だ．

2・2　最初の宇宙船「ヴォストーク」

上で述べたように，「ヴォストーク」は，人類初の宇宙飛行に使われた宇宙船だ（図 2-2）．ガガーリン宇宙飛行士はこの宇宙船に乗り，宇宙に飛んだのである．

そのカプセルは直径 2.3 m の球形で，1 人乗り．宇宙服を着て座ると，もう身動きすら難しい．しかも「ヴォストーク」は，このカ

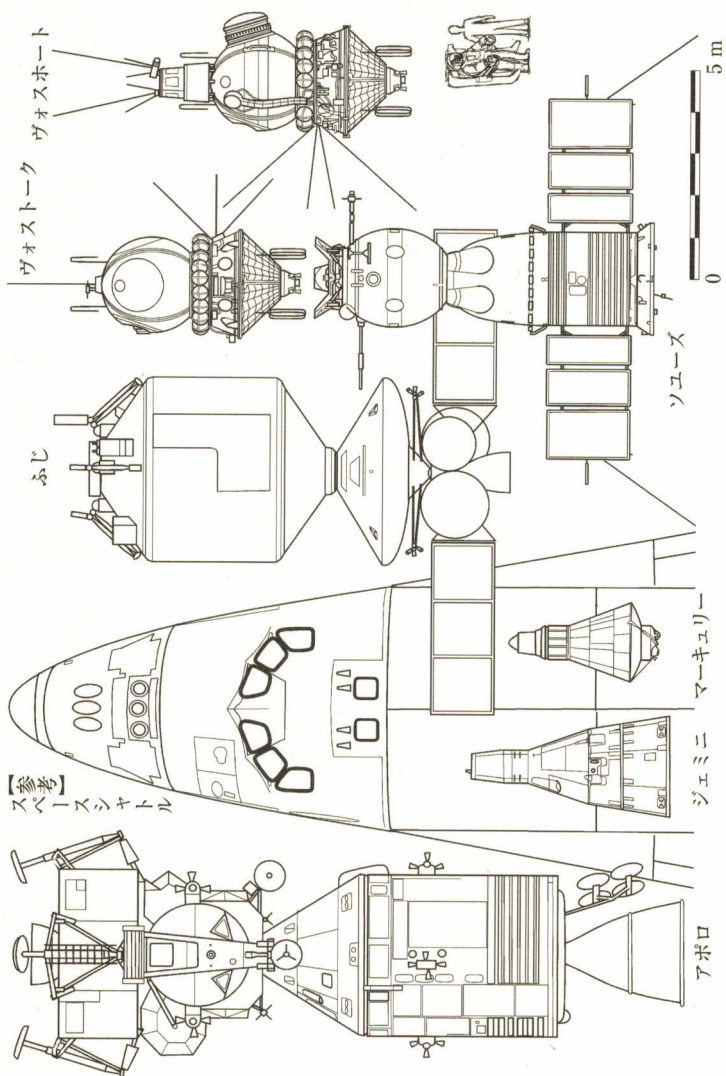



図2-1「ふじ」構想と，これまでに開発されたカプセル型宇宙船の比較(イラスト：田巻久雄)

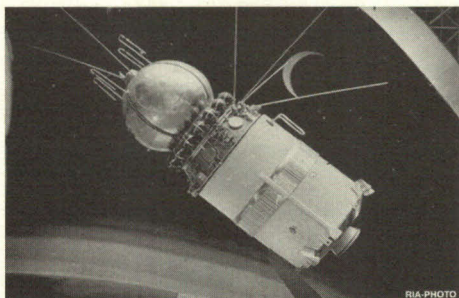



図 2-2 「ヴォストーク」宇宙船（写真提供：NASA）

プセルが安全に地表に降りられるだけの大きさのパラシュートを積むことができなかった．宇宙飛行士は，地表が近づいたら座席ごとカプセルから脱出し，パラシュートで地表に降りるのである．訓練に訓練を重ねた人物でないと乗れるものではなかった．

「ヴォストーク」は 6 機が打ち上げられた．1963 年 6 月 16 日に打ち上げられた「ヴォストーク 6 号」には，ワレンチナ・V・テレシコワ宇宙飛行士が搭乗し，宇宙を飛んだ最初の女性となった．

ソ連に完全に後れをとったアメリカは，起死回生の大計画を打ち出す．1960 年代のうちに人間を月に送り込み，安全に帰還させる——アポロ計画である．とはいえ，まずは人を宇宙に送り込むための技術を手に入れることが先決だった．

2・3 アメリカ，反撃の「マーキュリー」

「マーキュリー」は，「ヴォストーク」と宇宙一番乗りを競ったアメリカの宇宙船だ（図 2-3）．

直径 1.9 m，長さ 2.9 m，1 人乗りで，乗組員のためのスペースは 1.02 m^3 しかない．身を縮めて入り込めば，身動きすら難しい広さだ．2 回の有人弾道飛行の後，1962 年 2 月 20 日にジョン・H・グレン宇宙飛行士が，この「マーキュリー」宇宙船（通称「フレンド

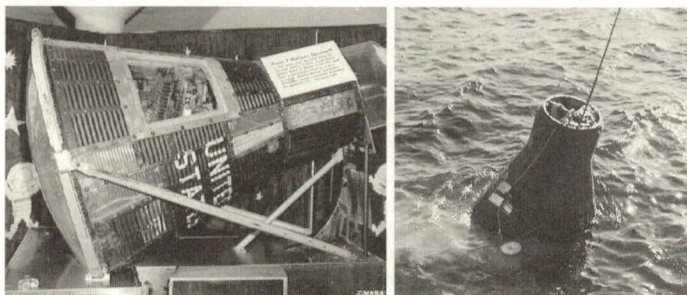



図2-3 「マーキュリー」宇宙船（写真提供：NASA）
左：「8号」，右：帰還した「フレンドシップ7」.

シップ7」）でアメリカ人としては初めて地球を3周まわった．

アメリカは，乗組員をカプセルから脱出させずに，海に着水させることで帰還時の衝撃をやわらげることにしたが，回収はその都度，海軍の艦隊が出動するという大がかりなものになった．この後「ジェミニ」「アポロ」に至るまで，アメリカは海上回収を採用することになる．

ちなみに，グレン宇宙飛行士の飛行のときに，アメリカは初めて「宇宙で食事をする」という実験を行った．メニューは，すりおろして裏ごししたリンゴを，歯磨きのようなチューブに詰めたもの．とてもおいしいなどと言えるものではなかった．なにしろ，無重力の宇宙空間でちゃんと食事ができるかどうか，誰も知らなかったのだ．飲み込んでも，食べ物が食道を降りていかずに詰まってしまうのではないか，などと言われていた．アメリカでは，逆立ちをしながら物を食べることを売り物にしていた芸人を調査した，というエピソードも残っている．

「マーキュリー」宇宙船は6機が打ち上げられ，次の「ジェミニ」にバトンタッチした．

アメリカの急追を受けて，ソ連は大急ぎで次の一手――複数の宇宙飛行士を乗せることができる宇宙船を用意した．

2・4　急ごしらえのピンチヒッター「ヴォスホート」

「ヴォスホート」は，アメリカとの競争に勝とうとしたソ連が，「ヴォストーク」のカプセルを基本に，最低限の装備を追加して最大3人が乗れるようにした宇宙船だ（図2-4）．むりやり詰め込んだ設計で，3人乗ったときには，乗組員は安全のための宇宙服を着ることすらできなかった．

「ヴォスホート」は，蛇腹式に伸びる簡易エアロックを装備しており，1965年3月18日に打ち上げられた「ヴォスホート2号」では，アレクセイ・A・レオノフ宇宙飛行士が機体の外に出て，人類初の宇宙遊泳を行った．ところが，レオノフ宇宙飛行士が真空の宇宙空間に出ると，中に空気が入っている宇宙服がパンパンに膨れて，体を動かすことができなくなってしまった．10分間の宇宙遊泳の間中，レオノフは膨らんだ風船のようになった宇宙服の中で手足を動かそうと必死の努力を続け，最後は宇宙服内部を減圧するという非常手段を使って宇宙船の中に戻った．もっとも，東西冷戦の真只

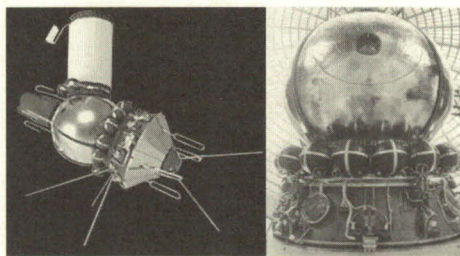



図2-4　「ヴォスホート」宇宙船
（写真はhttp://www.skyrocket.de/space/img_sat/voskhod-2__1.jpg（左），http://www.april12.de/voskhod/voskhodmain.htm（右）より転載）

中だった当時は，このような不名誉とも取れる話は公表されなかった．

急造の宇宙船だった「ヴォスホート」は，2回の打ち上げだけで運用を終了．そして，ソ連が「ヴォスホート」でお茶を濁している間に，アメリカは本格的2人乗り宇宙船「ジェミニ」で，ソ連に追いつき追い越そうとしていた．

2・5 「アポロ」への道しるべ「ジェミニ」

「ジェミニ」は，アメリカが「マーキュリー」に引き続き，アポロ計画のために必要な宇宙の長期滞在やランデブードッキングといった試験を行うために開発した宇宙船だ（図2-5）．

直径2.3 mで全長3.66 m．ほぼ「マーキュリー」宇宙船をそのまま拡大した形をしている．乗組員のためのスペースは2.25 m^3．だいたい自動車の前席ぐらいで，運用当時は「フォルクスワーゲン」に喩（たと）えられた．1人当たりで考えると，「マーキュリー」宇宙船とたいして変わらない．

「ジェミニ（Gemini）」＝「双子座」という名前からわかるように，完全な2人乗りだ．1965年3月から1967年にかけて10機が有人で打ち上げられ，ランデブードッキング，軌道変換，宇宙遊泳などのさまざまな実験を行った．

「ジェミニ」でアメリカは初めて，「軌道上で生活する」という課題に直面した．具体的にいえば“食べる”と“出す”だ．

“食べる”方は，グレン宇宙飛行士以来の実験で，きちんと食べられることがわかったので，問題は栄養と衛生と安全性，そして味となった．おいしい食事は人生の楽しみだが，宇宙食では「おいしい」ということ，つまり「味」が一番後回しにされた．「ジェミニ」のころの宇宙食は，文字通り「詰め込むだけ」のもので，宇宙飛行士たちに評判が悪かった．1965年3月23日に打ち上げられた最初

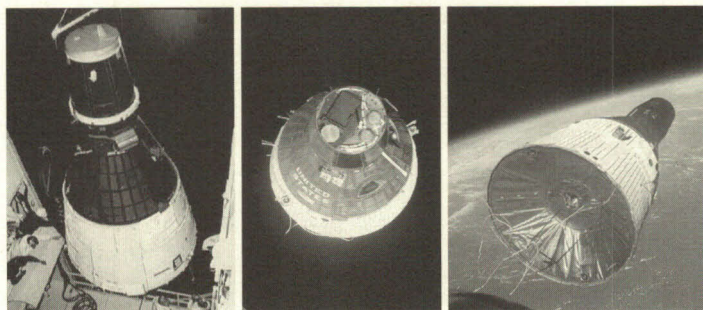



図 2-5 「ジェミニ」宇宙船（写真提供：NASA）
左：「3 号」，中：「6 号」，右：「7 号」

の有人ミッション「ジェミニ 3 号」では，ジョン・W・ヤング宇宙飛行士が，規則をやぶってコンビーフサンドを宇宙船にもち込むという事件が起きる．ヤング宇宙飛行士としては，まずい食事へのちょっとした抗議のつもりだったが，「飛び散ったパンくずが電子機器をショートさせる可能性がある」「宇宙飛行士たちは重大任務に対する自覚が足りないのではないか」と大問題に発展し，ついには議会で質問が出るまでになってしまった．

“出す”方は，専用の袋で用を足すことになったが，狭い船内で顔を突き合わせつつ排便するのは，かなり惨めな気分になる経験だったようだ．ちなみに“アメリカ初”は，1965 年 8 月の「ジェミニ 5 号」に搭乗したチャールズ・コンラッド宇宙飛行士だった．

1965 年 12 月 4 日に打ち上げられた「ジェミニ 7 号」に乗ったフランク・ボーマンとジェームズ・A・ラベルの両宇宙飛行士は，この狭い宇宙船で何と 13 日 18 時間もの宇宙滞在を実施したが，途中排泄物をしまう袋が破れるというトラブルに見舞われた．帰還したラベル宇宙飛行士が気分を問われて，「トイレの中で 2 週間暮らしてみればわかる」と答えている．

アメリカが着々と月への道を踏み固めていた時期，ソ連も秘密裏に月を目指していたが，結局失敗に終わった．責任者だったセルゲイ・コロリョフ博士の死，技術への政治の介入など理由はいろいろあったが，ただでさえ劣っていた国力を，組織間の権力闘争で分散してしまったことが最大の敗因だったといわれている．

だが，そんなことを知らない当時のアメリカは，ソ連の動向にピリピリしていた．1968年9月15日，ソ連は無人探査機「ゾンド5号」を打ち上げた．「ゾンド5号」は，月の裏をまわりインド洋に着水したが，イギリスのマンチェスター近郊にあるジョドレルバンク電波天文台は，月を巡る「ゾンド5号」が，ロシア語の通信を送信しているのを傍受した．声はテープの再生だったが，有人月飛行を目指した実験であることは明らかだった．負けるわけにはいかない．NASAはその年の末に予定していた「アポロ8号」のミッションを急遽，月周回に切り替え，そしてクリスマス・イブの12月24日，「アポロ8号」の3人の宇宙飛行士――ボーマン，ラベル，ウィリアム・A・アンダースは，月の裏側を自分の目で見た最初の人間となった．

アメリカを慌てさせた「ゾンド」は，ソ連の次世代有人宇宙船「ソユーズ」を一部改装したものだった．

2・6　現在も使われつづける偉大なワークホース「ソユーズ」

「ヴォストーク」と「ヴォスホート」が，「とにかく宇宙に行く」ための宇宙船だったのに対して，「ソユーズ」は「宇宙でさまざまな作業をする」ことを目的に開発された（図2-6）．

1967年4月の「ソユーズ1号」は，軌道上でトラブルが発生し，地上に緊急帰還したもののパラシュートが開かず，搭乗していたウラジミール・M・コマロフ宇宙飛行士が死亡するという事故を起こした．しかしその後，ねばり強い改良が加えられ，発展型の「ソユー

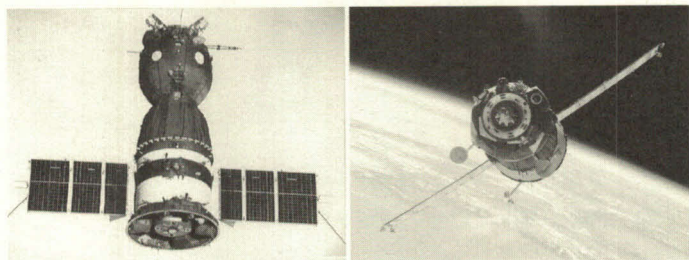



図 2-6　「ソユーズ」宇宙船（写真提供：NASA）
左：ASTP(2・7 節参照)に使用されたもの，右：最新型の「TMA」.

ズ T」，さらに改良された「ソユーズ TM」，無人の貨物輸送型「プログレス」，その改良型「プログレス M」とバリエーションを増やしつつ，30 年以上に渡って使いつづけられている．現在は，最新型の「ソユーズ TMA」が，国際宇宙ステーションの緊急脱出用宇宙船として使われている．

3 人乗りで，拡張モジュールと帰還カプセルという，「ふじ」と同じ構造をしている．というより，「ソユーズ」の基本設計がきわめてしっかりしており，「ふじ」でもそのレイアウトを踏襲することが一番合理的だったのだ．直径は「ふじ」より小さい 2.6 m．この中に 3 人が足を集めるような形で扇型に乗る．中は狭いが，「ヴォスホート」のように宇宙服が着られない，などということはない．また，軌道に上がると拡張モジュールがあるので，さほど狭く感じないそうだ．

「ソユーズ」は，おもに「サリュート」や「ミール」といった宇宙ステーションとの往復に使われたので，“食べる”も“出す”もあまり問題にならなかった．通常の運用スケジュールだと，「ソユーズ」は打ち上げ後 2 日かけて宇宙ステーションにランデブードッキングする．その間の我慢というわけだ．そこで，ソ連が“出す”方

に関してどういう手段をとったかというと，浣腸だ．1990年12月に，「ソユーズTM」で日本人初の宇宙飛行を行った秋山豊寛氏によると，打ち上げ前日に巨大な浣腸を打たれて，お腹を空っぽにされたそうだ．

2・7　月面着陸を実現した宇宙船「アポロ」

ジェミニ計画で，アメリカはついにソ連に追いつき，追い越した．いよいよ月面着陸を果たした「アポロ」宇宙船の出番である．1968年12月に打ち上げられた「アポロ8号」は，月のまわりを周回することに成功．そして1969年7月に「アポロ11号」が月に着陸するのである（図2-7）．初めて月面に降り立ったのはニール・A・アームストロング宇宙飛行士である．

「アポロ」宇宙船は，カプセル部分の直径が3.91 m，全長3.23 m

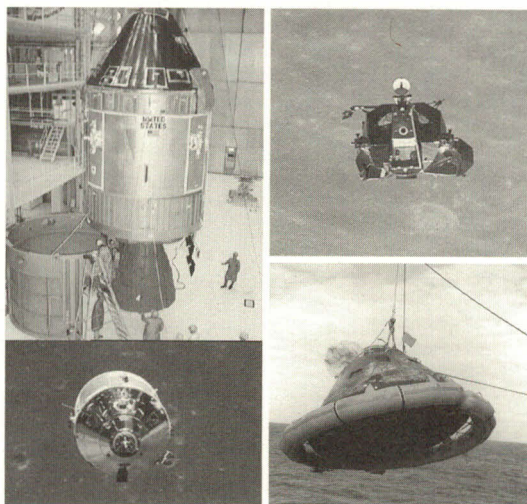



図2-7　「アポロ11号」宇宙船（写真提供：NASA）
左：本体，右上：月面着陸船，右下：帰還したカプセル．

となった．ほぼ「ふじ」と同じ大きさだ．乗組員のために用意されたスペースは 6.65 m^3 になった．1 人当たりでは「マーキュリー」「ジェミニ」の 2 倍以上．「フォルクスワーゲンの前席」に比べると，かなりましになったといってよいだろう．

3 人が余裕をもって搭乗できるようになったし，狭いながらトイレのためのスペースも用意された．食事についても，NASA が宇宙食のために新たな食品衛生管理基準（HACCP）を開発し，より多様な食事を提供できるようにした．HACCP はその後，地上の食品業界でも広く採用された．2000 年に起きた雪印乳業の食中毒事件で，同社が HACCP の認定を取っていたにもかかわらず，基準を遵守していないことが問題になったのは記憶に新しい．

広くなったといっても，大人が 3 人，最低でも 8 日間かかる月との往復を，このスペースで過ごすのは大変なことだった．月に向かう「アポロ」宇宙船には月面着陸船がドッキングしていたが，そちらは月に着陸するために無駄を徹底的に省いたぎりぎりの設計だった．操縦すら立って行ったのである．

1970 年 4 月 11 日に打ち上げられた「アポロ 13 号」では，月に向かう途中で酸素タンクが爆発する事故が起きた．すでに月にかなり近づいていたので，月の裏側を通過して地球に緊急帰還することになった．3 人の宇宙飛行士は，2 人が立って入ると一杯になる狭い月面着陸船に移り，月面着陸用の酸素で命をつないで，4 月 17 日に地球に帰還した．この事件は，トム・ハンクス主演で映画にもなったので，知っている人は多いだろう．

「アポロ」宇宙船は，「17 号」で終わったアポロ計画のほかに，アメリカ初の宇宙ステーション「スカイラブ」への往復，そして米ソが共同で行った「アポロ」と「ソユーズ」のドッキングテスト，ASTP（Apollo-Soyuz Test Program）に使われた．1975 年 7 月の ASTP が，アメリカ製カプセル型宇宙船最後の飛行となった．こ

の後のアメリカの有人宇宙活動は，翼をもち，機体を何度も使用するスペースシャトルが担うことになる．

2・8　とても快適になったスペースシャトル

最初のスペースシャトル「コロンビア」は，1981年4月12日に打ち上げられた（図4-1参照）．その後22年の間に，スペースシャトルは100回以上の運行を実施した．しかし，1986年1月28日の「チャレンジャー」爆発，2003年2月1日の「コロンビア」空中分解という2回の悲劇的事故も起こしている．

スペースシャトルは，過去のカプセル型宇宙船とはまったく違っていた．何より大きかった．地上に帰還する本体オービターは，全長が37.2 m，全幅が23.8 m，高さが14.1 mもある．旅客機でいえば，東京の羽田空港と地方空港を結んでいる150席クラスの双発機ぐらいの大きさがある．胴体の中央部には，長さ18.3 m，直径4.6 mものペイロード（搭載物）ベイがあり，最大29.5 tの荷物を運ぶ

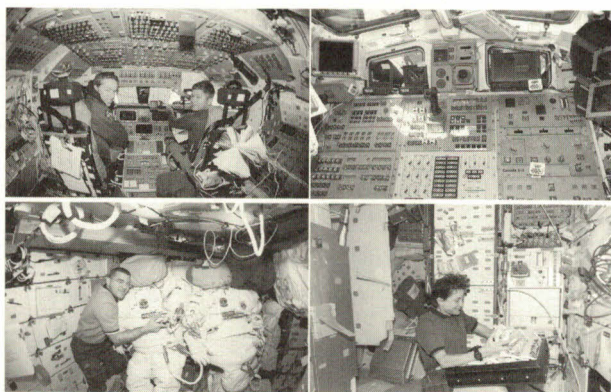



図2-8　スペースシャトルの内部（写真提供：NASDA）
上：アッパーデッキ（フライトデッキ），下：ミッドデッキ．

ことができる.

乗組員のためのスペースは，操縦を行うアッパーデッキ（フライトデッキ），軌道上での生活空間になるミッドデッキ，貨物置き場のロワーデッキの3階建て（図2-8）．容積は71.5 m^3 もある．スペースシャトルには最大7人が搭乗するから，1人当たりは10 m^3 強．「マーキュリー」の10倍，「アポロ」の5倍もの空間を使用できる．当然きちんとしたトイレも装備しており，長期間の飛行でも「トイレの中に住む」ような目にあわなくてもよいし，「ソユーズ」のような浣腸もなしだ．

食事は，「アポロ」からさらに進歩した．150種類以上のメニューが用意されており，乗組員は事前に自分の好みのメニューを注文できる．「マーキュリー」のころのチューブ入りすりおろしリンゴは，すでに伝説の彼方だ．

以上，駆け足で過去の有人宇宙船のことを，おもに居住性に重点をおいて紹介してきた．スペースシャトルが抜群に快適な居住性を提供していることがわかるだろう．

しかし，宇宙船はあくまで“乗り物”だ．“ホテル”ではない．乗り物には乗り物として最適な設計が存在するのではないか．

そこで次の章では，「ふじ」ではどのような設計戦略で，カプセル型宇宙船の問題点を補って，真に未来を拓く宇宙船を目指すのかを解説しよう．

第3章　カプセル型宇宙船に新たな展開を
—さまざまな技術で問題点を克服—

3・1　今ある技術を取り入れて，カプセル型宇宙船に新風を

スペースシャトルが運航を開始してからすでに22年，スペースシャトル以前の古い形式を改めてもち出す理由はどこにあるのか．

この章では，「カプセル型宇宙船の問題点とされることは，本当に問題なのか」を考えてみよう．じつは，現在すでに存在する技術をフルに活かせば，カプセル型宇宙船の問題点をすべて補うことができる．最初のカプセル型有人宇宙船「ヴォストーク1号」から42年，技術は確実に進歩している．

なにしろ，すべて今ある技術を取り入れるだけだから，新しい技術を開発する必要はない．開発期間は短くて済むし，できあがった宇宙船の信頼性も高くなる．

3・2　カプセル型宇宙船の疑問点その1：打ち上げ時の安全性

疑問1：打ち上げ時が危険である．打ち上げのときの安全性が，打ち上げに使うロケットに依存する．

「ふじ」最初の打ち上げに利用するH-IIAロケットは，成功率95％を目指して設計されている．20回に1回は失敗しても仕方がないという条件で設計してあるのだ．

一方，有人で運用されているスペースシャトルは，99％以上の安全を目指して開発された．それでも1986年1月には「チャレン

ジャー」爆発事故，そして2003年2月には「コロンビア」空中分解事故と，人が死ぬ大惨事を2回引き起こしている．

スペースシャトルですら事故を起こす．20回に1回失敗するかもしれないようなものに，人を乗せるわけにはいかない．20回に1回の割合で墜落する旅客機など，誰も乗ろうとはしないだろう．

だからといって，スペースシャトルのように，事故を起こさないようにできる限りの信頼性を追求したロケットを開発したならば，ロケットのコストが思い切り跳ね上がり，結局，宇宙に行くためのコストが高くなってしまう．これでは，「ふじ」に人を乗せるなどもってのほか，ということになる．

ところが，考え方を変えると，カプセル型宇宙船はスペースシャトルよりも安全なのである．「事故を起こしてはならない」ではなく，「事故が起きても，乗っている人が無事ならばよい」と考えて設計するのだ．

別に新しい技術を使うわけではない．決め手は脱出ロケットだ．

疑問1への回答：脱出ロケットを使って，いつでも安全に脱出できるようにする．

脱出ロケットは，打ち上げ時に何か起きたとき，人間が乗ったコア・モジュールをロケットから速やかに安全なところまで引き離すための緊急用装備だ．珍しいものでも何でもなく，ごく普通にカプセル型有人宇宙船の打ち上げに使われているものである．図3-1が「アポロ」宇宙船で使われた脱出ロケットだ．

打ち上げ途中で，ロケットが何らかの原因で予定していたコースを外れたとしよう．そのままではとんでもないところに落ちて，地上に被害を及ぼす可能性がある．地上の管制局から自爆コマンドを送って，ロケットを破壊する必要がある．

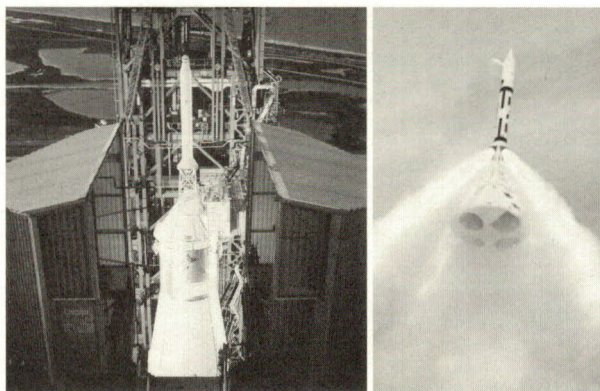



図3-1　「アポロ」宇宙船の脱出ロケット（写真提供：NASA）

そのとき，まずコア・モジュールをロケット本体から切り離すと同時に，脱出ロケットを点火するのだ．脱出ロケットはごく短時間に大きな推力を発生して，コア・モジュールを速やかにロケットから引き離す．コア・モジュールが十分安全な距離にまで離れたら，ロケットを爆破すればよい．コア・モジュールはパラシュートを開いて地上に帰還する．宇宙には行けないが，乗組員は死ななくてすむわけだ．

脱出ロケットを使うと，地上から軌道到達直前までのどの段階であっても，脱出が可能という利点がある．発射台上でトラブルが起きてロケットが爆発しても，脱出ロケットを作動させれば，コア・モジュールは空中に放り出されてパラシュートで降りてくることができる．これは軌道到達直前のトラブルでも同じだ．

スペースシャトルは，横についている固体ロケットブースターが動作している打ち上げ後2分まで，一切の脱出手段が使えない．「チャレンジャー」の事故は，まさにその固体ロケットブースターがトラブルを起こし，結果として機体とともに7人の乗組員の命が

失われた．

ちなみに，「ソユーズ」の打ち上げでは，1983年9月に，打ち上げるばかりになっていたロケットが，発射直前に火災を起こすという恐ろしい事故が起きている．ロケットのてっぺんにいた2人の乗組員は，カプセルごと脱出ロケットで空中に射出され，無事だった．

打ち上げ時のトラブルを実績で評価するならば，カプセル型宇宙船の方が，スペースシャトルより安全なのである．

3・3　カプセル型宇宙船の疑問点その2：再突入加速度

疑問2：再突入加速度が大きく，一般人には乗れないのではないか．

カプセル型宇宙船は，大気圏に再突入するときに大きな加速度がかかる．場合によっては，自分の体重が8倍になるほどだ．そんな加速度に耐えられるのは，屈強な男ぐらいであって，普通の人はカプセル型宇宙船の搭乗には耐えられない．

一方，翼をもつスペースシャトルは，体重が3倍になる程度の加速度ですむ．これは，遊園地のジェットコースターの最大加速度（36頁脚注参照）よりも小さいぐらいで，十分普通の人も耐えることができる．

加速度の単位は，高校の理科で習うように m/s^2 だ．しかし，体感する加速度の場合，「地球の重力加速度の何倍」という表し方をよくする．地球の重力加速度は約 $9.8\ m/s^2$．これを1Gと表す．「グラム」ではない，「ジー」だ．たとえば，加速度が2Gというと，体重が2倍になるということである．

さて，確かにアメリカが有人宇宙飛行初期に開発したカプセル型宇宙船「マーキュリー」では，大気圏に再突入して地上に帰還する

ときに，最大で8Gもの加速度がかかった．宇宙飛行士は，自分の体重が8倍にもなる環境に耐えないと地上に帰還できなかったのである．これは，普通の人にとっては耐えられないほどの過酷な条件である．場合によっては，骨折や内臓損傷などの怪我を負う可能性もある．

宇宙に行ったものの，帰還時にとてつもない加速度に耐えなければならないとなると，とてもではないが普通の人の乗るものではなくなってしまう．

ところが逃げ道がある．揚力突入という方式だ．揚力とは浮かぶ力のこと．飛行機は，翼で前に進む推力を揚力に変えて浮かんでいるのである．翼をもたないカプセル型宇宙船でも，カプセルそのもので揚力を発生させられるのだ．

疑問2への回答：揚力突入で再突入時の加速度を小さくする．

図3-2は，揚力突入をしない場合とした場合のカプセル型宇宙船の再突入姿勢だ．

揚力突入をしない場合には，耐熱材を貼った底面をまっすぐ進行方向に向けて大気圏に突っ込んでいる．空気から受ける力はすべて抵抗となり，宇宙船を減速する．空気抵抗はすべて加速度となるので，搭乗する宇宙飛行士には大きな加速度がかかる．「マーキュリー」や「ヴォストーク」ではこの方式で地球に帰っていたので，宇宙飛行士は体を鍛えている軍人に限られていた．

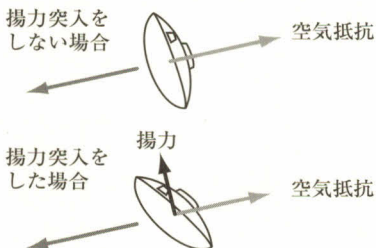



図3-2　揚力突入をしない場合とした場合のカプセル型宇宙船の再突入姿勢

一方，揚力突入をした場合は，底面を進行方向に対して傾ける．こうすると，空気から受ける力は，空気抵抗とカプセルをもち上げる揚力の二つに分かれる．その分，加速度は小さくなるわけだ．このやりかただと，同時に突入時の姿勢を少し変えることで，最終的に落ちる位置を少し変えることができる，という利点もある．

図3-3は，コンピューター・シミュレーションで得られた揚力突入をした場合の加速度だ．地球周回軌道からの帰還を想定している．まっすぐ突入すると（トリム仰角0度），7Gを超える加速度がかかるが，揚力突入をすれば（トリム仰角25度）加速度は4G以下になることがみてとれる．

脱出ロケットと同様に，揚力突入も新しい技術ではない．「アポロ」は月からの帰還に揚力突入を使っていた．月から帰還する「アポロ」の速度は，地球周回軌道をまわっている宇宙船よりもはるかに大きい．そのまま一気に大気圏に突入すると，中の人間がつぶれてしまいかねないほどの加速度がかかる．そこで「アポロ」は，揚

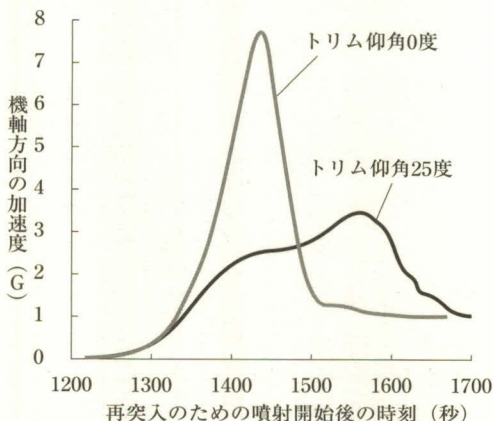



図3-3　揚力突入をした場合の再突入加速度
（NASDA資料より）

力突入を行って加速度を低減すると同時に，得られる揚力で再度大気圏外に飛び上がり，もう一度再突入を行うというやりかたで帰還した．水面に石を投げて何度も跳ねさせるのと同じで，大気圏上部で跳ねることで加速度を小さく押さえたのである．それでも，月からの帰還には6Gがかかることが避けられなかった．

30年以上前のアポロ計画で実施されていた揚力突入を使えば，地球周回軌道からの帰還時には，加速度を4G以下に押さえることができる．つまり，ジェットコースターよりも小さい加速度※で帰ってこられるのである．

3・4 カプセル型宇宙船の疑問点その3：帰還位置の制御

疑問3：カプセル型宇宙船は最終的にどこに帰還するかが制御できない．このため，回収のためには広範囲に回収部隊を配置しなければならず，運用コストが高くなる．

アメリカのカプセル型宇宙船は海に帰還したが，回収にはアメリカ海軍の艦隊が出動しなくてはならなかった．ロシアの「ソユーズ」は，見渡す限り何もないカザフスタンの平原に帰還する．カプセル型宇宙船の再突入は非常に微妙なもので，どうしても狙ったところからkm単位の誤差が発生することが避けられない．

しかし，現在の技術を使えば，この問題は解決することができる．使うのはGPSとパラフォイルだ．

※ 遊園地のジェットコースター類の加速度は，栃木県の那須ハイランドパークのビックバーンコースターが4.81G，熊本県の三井グリーンランドのNIO（ニオー）が4.69G，東京ドームシティアトラクションズ（旧後楽園ゆうえんち）のリニアゲイルが4.49G，などとなっている．

疑問3への回答：GPSとパラフォイルで着陸地点へ精密誘導し，ピンポイント着陸を可能にする．

GPSはご存じの通り，最近は自動車に搭載されているカーナビゲーション装置（カーナビ）にも使われている，人工衛星を使った位置測定システムだ．高度約2万kmの軌道上にある24機の人工衛星（6軌道面に4個ずつ配置）が送ってくる信号を利用して，自分のいる位置を測定するものである．

GPSは，アメリカ国防総省が軍事用途のために，1970年代から莫大な投資をして開発したシステムだ．信号の一部は民間にも開放されており，世界中で利用できる．

システム開発当初，アメリカは民間用の信号にはわざとノイズを加えて位置測定の精度を悪くする権利を保有していた．事実，1990年の湾岸戦争では，民間用GPS信号の測定精度が一時悪化した後に急に向上するという現象が起きている．これは，敵の利用を防ぐために衛星が送る信号にノイズを乗せたものの，軍用受信機の調達が間に合わず，民間用受信機を軍に配備することになり，ノイズの混入を停止した結果だ，と説明された．軍用なので国防総省も細かい情報を公開しておらず，受信した信号の解析からこのようなことが判明したのだ．

その後アメリカは，民生用としてのGPSの有用性を認めた．クリントン政権のときに，ゴア副大統領が将来的には軍用の信号も民間に公開すると発表した．その後は，あえてノイズを加えることをしていないようだ．

現在，GPS受信機があれば，世界中のどこでも自分の位置を10m程度の精度で知ることができる．さらに，レーザー測距などで位置が正確にわかっている場所でGPS信号を受信して，測定結果

とその場所の正確な位置を比較し誤差を検出して，地上波のFM放送などに乗せて近隣の受信機に知らせるディファレンシャルGPSという手法を使えば，精度は1m以下にまで向上する．

このGPSを使って，パラシュートで降りてくるカプセル型宇宙船を操縦して，ピンポイント着陸させようというのである．

ちょっと待った！

「パラシュートで降りてくるカプセル型宇宙船を操縦」と書いたが，パラシュートは操縦も何もできなかったのではなかったか．

確かに，かつてよく使われたお椀型のパラシュートは，大幅な操縦はできなかった．風の影響も受けやすく，狙った位置に着地するのは非常に難しかった．ところが現在は，操縦できるパラシュートが存在するのである．その名もパラフォイルという．

最近，スカイダイビングで使われるパラシュートがお椀型ではなく，長方形をしているのはご存じだろうか．あれがパラフォイルだ．パラフォイルは，長方形の後ろの縁の左右をワイヤーで引っ張って曲げることで左右に操縦できる．

パラフォイルは，風をはらむパラシュートの屋根の部分が翼になっている．グライダーのように前に滑空するわけだ．だから，翼の後縁を曲げることで左右に進路を変えることができる．

パラフォイルには，もう一つのすぐれた特徴がある．地面が迫り，あと少しで着陸というところで，左右の後縁を操縦するワイヤーを思い切り引っ張って，前進のエネルギーを上に浮くための揚力に変換するのだ．そうすると降下速度が一時的にゼロになり，衝撃なしの着陸が可能になる．これはフレアという手法である．

ロシアの「ソユーズ」は，お椀型のパラシュートを装備している．再突入カプセルの容積は限られており，十分に降下速度を小さくできるだけの大きなパラシュートを搭載することができない．そこで，「ソユーズ」の再突入カプセルには，地表2mで点火する逆噴射ロ

ケットが装着されている．地表ギリギリで逆噴射を行うことで着陸の衝撃を緩和しているわけだ．ちなみに，アメリカのカプセル型宇宙船は，衝撃を緩和するために海に着水させていたのである．

パラフォイルを使えば，ソユーズのような装備を使わずに，陸上に衝撃なしの着陸が可能になる．

パラフォイルは，すでに十分に研究された安全な技術だ．アメリカには，戦車を輸送機から投下するための巨大なパラフォイルも存在するぐらいである．カプセル型宇宙船に使えるパラフォイルを製造する技術は，すでに存在しているのだ．

着陸の最終段階で，パラフォイルを拡げた「ふじ」コア・モジュール（図3-4）は，GPSにより自分の位置を確認しつつ，自動操縦で着陸地点へ近づいていく．降下の経路は，予定よりも高めになるように設定する．予定よりも高ければ，進路を左右に振って高度を処理して，最後にフレアをかけることで予定の場所にふわりと接地で

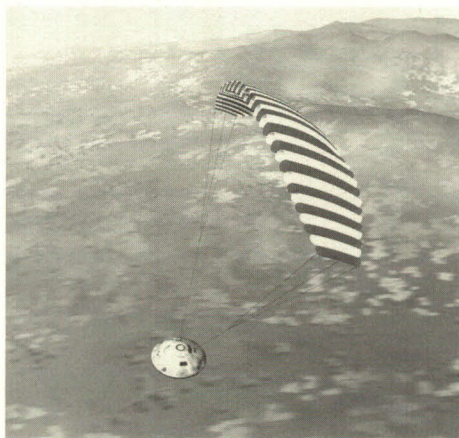



図3-4　パラフォイルで減速降下する「ふじ」
（イラスト：小林伸光）

きる．操縦もフレアのタイミングもコンピューターによる自動制御だ．その着陸は，スペースシャトル以上にスムースなものになるはずだ．

「着陸の最終段階における操縦による着陸位置の修正は，そんなに大きくできない．そもそも再突入でまったく違う場所に降りることになってしまったら，無意味ではないか」と考える人もいると思う．確かに，軌道上の事故で一刻も早く地球に帰還しなければならないときのような場合には，あまり意味がない．とはいえ，地上の状態を観察しつつ，もっとも着陸に適当な位置に降ろすということも可能になるので，あながち無意味というわけではない．

問題は，通常の再突入のときに発生する着地位置のばらつきが，パラフォイルの操縦で修正できる範囲内にあるかどうかということだ．カプセル型宇宙船は，重心の位置や大気圏に突入する際の姿勢で，最終的な着陸位置が大きく変わる．実際問題として，着陸位置にはどの程度のばらつきが生じるのだろうか．

表3-1は，アメリカが1960年代に打ち上げたカプセル型有人宇宙船「ジェミニ」が，予定からどれだけ離れた位置に着水したかを

表3-1　「ジェミニ」宇宙船の着水精度（NASA資料より）

機体ナンバー	着水日時	目標とのズレ
ジェミニ3号	1965. 3. 23	107 km
ジェミニ4号	1965. 6. 7	80 km
ジェミニ5号	1965. 8. 27	168 km
ジェミニ6号	1965. 12. 16	13 km
ジェミニ7号	1965. 12. 18	11.8 km
ジェミニ8号	1966. 3. 16	緊急事態で予定と異なる海域に着水
ジェミニ9号	1966. 6. 6	1.3 km
ジェミニ10号	1966. 6. 21	5.4 km
ジェミニ11号	1966. 9. 15	4.9 km
ジェミニ12号	1966. 11. 15	4.8 km

示した．「ジェミニ」は揚力突入を使っているので，「ふじ」がどの程度の精度で着陸できるかの目安になる．これをみると，技術的に安定した後半の打ち上げでは，悪くとも予定地点から 5 km 程度の位置に着水していることがわかる．もっとも精度が高かった「ジェミニ 9 号」では，目標から 1.3 km のところに着水している．40 年近く前の「ジェミニ」の技術で，予定地点から 1 km のところにカプセルを降ろすことができるのである．

さらに，もう一つの有利な要素が「ふじ」にはある．「ふじ」は揚力突入を利用する．このときに機体を左右に傾けることで，再突入時にある程度の操縦が可能になるのだ．パラフォイルを開く前の段階で，着陸目的地を目指した操縦ができるわけである．

その上で，「ふじ」はパラフォイルによる着陸位置の修正を行う．「ふじ」のパラフォイルは，高度 5000 m 程度のところで開くことを予定している．5000 m を降下する間に，水平方向に最大でどれだけ進めるかが，そのまま着陸位置を修正する能力を示すことになる．現在のパラフォイルで，この値はだいたいのところ 10〜15 km である．再突入時のばらつきを修正するのに十分な能力だ．この値の大きなパラフォイルは空中で開くのが難しくなるので，「ふじ」ではもっと小さな値のパラフォイルを使って，トータルでみた安全性を高めることになるだろう．

結論を言おう．「ふじ」はまさに狙った地表の一点に，着地の衝撃なしに着陸できるのだ．

3・5　カプセル型宇宙船の問題点はすべて現在の技術で解決できる

ここまでのところで，1 回まとめておこう．

従来，カプセル型宇宙船で問題とされていたことは，すべて現代の適切な技術を使うことで解決できる．歴史をたどるならば，むし

ろカプセル型宇宙船は，その技術的な可能性を十分に追求されないうちに，有翼再利用型のスペースシャトルへと進んでしまった，といえるかもしれない．

カプセル型宇宙船で，スペースシャトル並みに快適な宇宙旅行を実現することは可能なのだ．

しかもカプセル型宇宙船の場合，開発にあたって，新しく開発しなければならない技術的要素が非常に少ないという利点もある．新規の開発要素が少なければ，開発を期限通り予算超過なしに行うことが容易になる．

「ふじ」の開発で必要となる技術で，現在の日本が保有しておらず，新たに開発しなければならない技術要素は二つ．脱出用ロケットと生命維持システムだ．そのほかは，すでに存在する技術を組み合わせることで，「ふじ」を完成させることができるのである．

新しい技術というのは，一見格好よく思えるが，裏を返すなら不確定要素にほかならない．確かに新しい技術を開発しつづけなければ，技術の進歩はない．とはいえ，新しい技術開発に必要以上に挑んでいくことは，何のためかがわからない技術，技術開発のための技術開発へと陥る危険性がある．

手堅い技術の成功例として，東海道新幹線を挙げておこう．新幹線の開発を指揮した島 秀雄氏は，「新幹線には新しい技術は何もありません」という言葉を残している．東海道新幹線は，（当時の）国鉄技術陣が行ってきた技術開発の集大成で，新たに開発したものは何もない．強いていうなら，高速列車専用の軌道を敷設して，ほかの遅い列車と無関係なダイヤを編成した，ということだけが新しい．だからこそ，1960年から1964年という短期間で完成させることができたし，その後も無事故で運行することができたのだ．

「ふじ」の目的は，日本の技術で日本人を宇宙に送ることだ．目的を手堅く実現するためには，技術開発要素を最少にすることが必

要になる．その意味でも，「ふじ」構想がきわめて実現性の高い，手堅い構想であることが理解していただけると思う．

さて，ここまでわざと触れないでいたことがある．「カプセル型宇宙船は，1回限りで使い捨ててしまう．これではコストがかかって仕方ないのではないか」という問題だ．これはかなり重要な問題なので，章を改めて解説しよう．まずは，スペースシャトルの問題点を分析してみることにする．

第4章　スペースシャトル,その高コスト構造

4・1　古くなった未来の象徴，スペースシャトル

1981年4月12日，最初のスペースシャトル「コロンビア」がフロリダのケネディー宇宙センターから打ち上げられた（図4-1）.

NASAは「スペースシャトル時代の到来」を宣言し，低コストの輸送手段としてのスペースシャトルが，宇宙の商業化を進めることになるとして，近い将来スペースシャトルは週に1回，年間50回の打ち上げを行う，と説明した．スペースシャトルは機体を再利用するので，機体を1回の飛行毎に使い捨てる「マーキュリー」「ジェミニ」「アポロ」よりも低コストで宇宙と往復することになるはずだった.

スペースシャトルの初打ち上げの時期，カプセル型宇宙船の問題点として，次のようなことが指摘されていた.

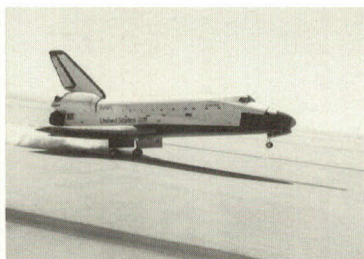



図4-1　スペースシャトル「コロンビア」の初飛行(1981年4月，STS-1．写真提供：NASA)

疑問 4：カプセル型宇宙船は，帰還したカプセルを再度利用することができない．

カプセルは1回限りの使い捨てである．打ち上げに使うロケットもまた使い捨てである．機体を使い捨てにするのだから，運用コストは高くつく．これを避けるには，再利用型の打ち上げ機を開発するしかない．カプセル型宇宙船は，製造コストがそのまま運用コストに積み上げられるので，運用コストを下げることができない．

カプセル型宇宙船は“使い捨て”を前提としている．「ふじ」構想も，コア・モジュールはもちろんのこと，標準型で使う拡張モジュールも推進モジュールも，すべて1回限りの使用を前提にしており，“使い捨て”だ．だから，製造コストはそのまま運用コストに上乗せされることになる（コストの分類については9・2節参照）．

たとえば旅客機は，機体の寿命が尽きるまでに何万回ものフライトを行う．したがって，フライト1回当たりの製造コストはぐっと小さくなり，運用コストは燃料や整備費用などが中心になる．もしも，旅客機を1回のフライトで捨ててしまったら，乗客が支払う料金はとてつもない金額になるだろう．

確かに使い捨ては不合理で，何回も利用できる再利用型の宇宙船の方が合理的に思える．となれば，宇宙船そのものも，宇宙船を打ち上げるロケットも，再利用できるものなら再利用したい．

そしてスペースシャトルでは，主エンジンの再利用を目指して，宇宙船とロケットが融合し，大きな翼をもつ形態が採用された．旧ソ連も，「シャトルスキー」などといわれたシャトル「ブラン」を開発し，1988年11月に無人で飛行させている．欧州は，1980年代から90年代前半にかけて，「ヘルメス」というミニシャトルの開発

を検討し，一時期はヘルメスペース社という開発のための会社も設立した．日本も同時期に，ミニシャトル「HOPE」を検討し，実験を重ねてきた．「アポロ」以降の世界のトレンドは，有翼の再利用型にあったことは間違いない．

「航空宇宙」という言葉があるように，飛行機と宇宙船は一緒に考えられやすい．飛行機は何度も使うのだから宇宙船だって，というのは非常にわかりやすい議論だ．

4・2　死屍累々の再利用型宇宙機の開発

ところが，そう簡単な話ではなかったのだ．

「ブラン」は1回の飛行のみで計画中止，「ヘルメス」は機体の重量超過を解決できずに計画中止，「HOPE」も実機に向けて軌道上で運用されるはずだった実験機「HOPE-X」の開発が凍結になり，基礎研究だけが進められている．

じつは，完全再利用を目指した宇宙機の計画は，元祖スペースシャトルを除き，ことごとく失敗か中止の憂き目をみているのだ．

ここ数年に限ってみても，まずNASAの完全再利用型実験機「X-33」が，実機をついに完成させることができずに計画中止になった（5・9節参照）．やや小さな再利用型機体を目指した実験機「X-34」も，機体は完成したものの見込み無しということで計画中止．スペースプレーンに不可欠のエンジンといわれるスクラムジェット・エンジン（6・2節参照）を試験するための実験機「X-43」は，2001年6月2日に，空中発射型ロケット「ペガサス」の先端に乗せられて発射されたが，ロケット側のトラブルで実験は失敗に終わっている．そして，完全再利用型宇宙機の先駆けとなるはずだったスペースシャトルは，「チャレンジャー」と「コロンビア」の2機を事故で失った．

死屍累々（ししるいるい）としか言いようのない現状．いったいなぜ，そんなこと

になっているのだろうか．

先入観を捨ててきちんと検討していくと，飛行機と宇宙機はまったく別物であることがわかってくる．飛行機の感覚で宇宙機を考えることは，開発すべき技術目標の難易度を見誤らせる可能性があるのだ．じつのところ，①再利用型有人宇宙輸送システムは，使い捨てのカプセル型宇宙船と比べて，必ずしも運用コストが安くなるとは限らない．さらには，②再利用可能な宇宙輸送システムを開発することは，原理的に不可能ではないが，きわめて難易度が高く，困難なのである．

まず，「①再利用型有人宇宙輸送システムは，使い捨てのカプセル型宇宙船と比べて，必ずしも運用コストが安くなるとは限らない」という方から説明しよう．②については第5章で説明する．

4・3　今より高価だったコンピューターが再利用を後押し

そもそも，アメリカがアポロ計画以降，カプセル型宇宙船からスペースシャトルへと進むことになった理由は，機体がとても高価で，回収して再利用した方がよいと判断したからだ．それでは，なぜそんなに高価だったのか．

じつはアビオニクスが高価だったのである．アビオニクスというのは搭載電子機器のこと．簡単にいえば，機体に搭載したコンピューターがとても高価だったのである．「アポロ」の場合，アビオニクスのコストが機体全体の3分の1も占めていた．

だが，当時のアビオニクスの計算能力は，現在の水準からするとまるでたいしたことがない．計算速度で比較するなら，「アポロ」のコンピューターは，任天堂のゲーム機「ファミリーコンピュータ」(通称「ファミコン」) 程度だった．今から20年以上前の1984年に任天堂が発売して大流行，家庭用ゲーム機の基礎を築いた8ビット・ゲーム機と同じ程度の能力のコンピューターで，30数年前の「ア

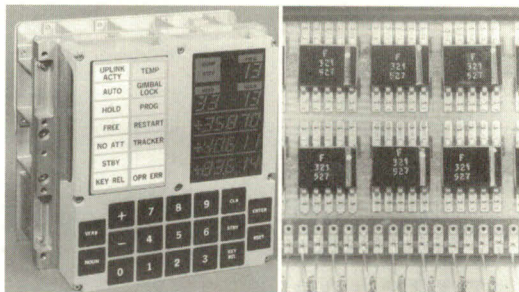



図 4-2　「アポロ」に使われたコンピューター
（写真提供：Raytheon, from the files of Jack Poundstone／The Charles Stark Draper Laboratory, Inc）

ポロ」は動いていたのである（図 4-2）．もちろん，計算結果の安全性は考えられており，ファミコンと同程度の計算速度のコンピューターにエラー派生を監視する装置を組み合わせ，トラブルが起きても検出して計算をやり直す，というシステムを組んであった．

そして，20 数年前から運行しているスペースシャトルは，約 15 年前の 1990 年に発売された 16 ビット・ゲーム機「スーパーファミコン」（通称「スーファミ」）と同じ程度の能力のコンピューターで飛んでいるのである．こちらは 5 台のコンピューターが多数決をしており，それとは別に 1 台のコンピューターが 5 台まとめてダウンしたときのために搭載されている．

半導体業界には「ムーアの法則」と呼ばれる経験則がある．コンピューターの実装密度と計算速度は 18 か月ごとに 2 倍に向上する，というものだ．実際 1970 年代後半以降，コンピューターはほぼこの法則に沿って急速に能力が上がり，同時に価格は低下していった．アポロ計画からスペースシャトル開発へと移り変わる 1970 年頃には，想像すらできなかった事態だといえるだろう．今，「アポロ」宇宙船のコンピューターの何万倍もの能力をもつ最新の CPU を搭

載したパソコンが，それこそ10万円以下で買える．

現在の技術をもってすれば，かつては機体コストの3分の1を占めたアビオニクスは，ほとんどゼロに近いコストで製造できる．しかも，現在の電子機器は消費電力が小さく，本体質量も「アポロ」のころとは比べ物にならないぐらい軽くなっている．その分，機体そのものも軽く小さくできるし，小さく軽くなった機体は，その分安くつくることが可能になる．

もちろん，「アポロ」やスペースシャトルに使われたコンピューターのすごさは，計算速度にあるのではない．そんな低い性能のハードウェアで，それこそ月までの往復飛行を可能にしたソフトウェアがすごいのである．そんなソフトウェアの開発には相応のコストがかかる．けれども，ソフトウェアは一度完成すれば，後はバグを修正していくことで完成度を上げるための保守コストしかかからない．機体1機ごとに生産コストがかかるということはない．

宇宙開発の事情を知る人は，反論するかもしれない．

「宇宙用電子機器は，宇宙放射線に対して確実に動作するように保証しなければならない．また，温度をはじめとした対環境特性や，信頼性の面でも，地上で使う民生用の機器とはまったく異なる基準が存在する．だから，いくら『アポロ』やスペースシャトルの時代よりも，電子部品が高性能かつ安くなっているとしても，そのまま宇宙用の部品が高性能で安くなるわけではない」

その通り．現在もロケットや衛星に使われる部品は，厳しい試験の末に「宇宙空間でも使える」ことを認定されたものだ．その価格は，同性能の民生部品に比べると，それこそ百倍以上というとてつもない高さである．それでも，一度軌道上に行ってしまってから，故障ですべてが駄目になってしまうよりもましなのだ．

しかし，「ふじ」構想では，積極的に価格の安い民生部品を採用することで補う．第10章で改めて詳しく説明するが，適切な方法

論さえあれば，民生部品を宇宙機に適用することができるのだ．

かつては機体全体の再利用をも決意させるほどだったコスト要因のアビオニクスは，今となっては，コスト的にまったく問題にならない．再利用を行う理由にはならないのである．

4・4　整備費用が高騰したスペースシャトル

では，アビオニクス以外の機体を再利用することはどうだろうか．スペースシャトルのあの大きな機体は，使い捨てにしてしまうにはあまりにも高そうだ．スペースシャトルの場合には，機体に3基の主エンジンSSMEが付いている．これも使い捨てにするには，あまりにも高価に思える．

この問題に対する答えとして，スペースシャトルが帰ってきてから整備を受けて，再度打ち上げられるまでのコストを問題にしよう．

じつは，NASAの予算から知ることができるスペースシャトルの運用コストは，全然安くない．使い捨てのロケットよりもはるかに高いのである．

NASAは，スペースシャトルの運用コストを公開していないが，予算の中のスペースシャトル関連経費から，だいたい1回の運用コストが計算できる．2002年度予算では，32億8380万ドルで7回の飛行を行うことになっているので，1回当たりの運用コストは4億6911万ドルかかっていることになる．現在の為替レート（およそ1ドル＝130円）で約610億円だ．スペースシャトルのペイロード打ち上げ能力は，地球のすぐ近くをまわる地球低軌道に29.5 t．トン当たりに換算すると1590万ドル，日本円にして約21億円．一方，日本のH-ⅡAロケットは，地球低軌道に10 tを打ち上げることができる．トン当たり8億5000万円．使い捨てロケットの方が安いのだ．

その理由はいくつかある．

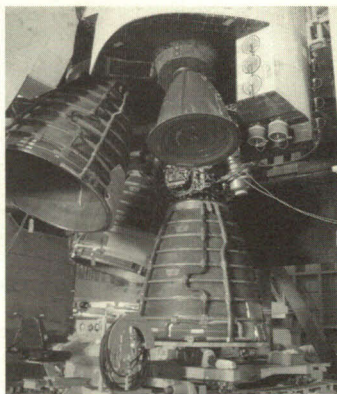
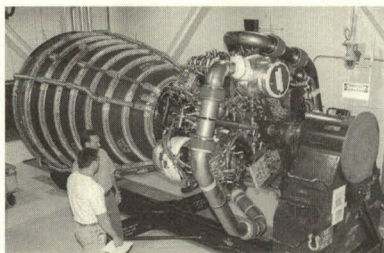



図 4-3　スペースシャトルの主エンジン SSME（写真提供：NASDA）

まずスペースシャトルが，人とペイロードを一緒に打ち上げる設計になっていることだ．スペースシャトルは，ペイロードと人間が同じ機体で打ち上げられる．ペイロードと人間を同じ安全基準で打ち上げようとすると，人間を乗せる場合の安全基準をペイロードにも適用せざるを得ない．ペイロードだけなら安全基準を緩くして，その分安く打ち上げることができるが，人が乗ることが前提のスペースシャトルでは，無人打ち上げはできないのである．さらには，地上に帰還するための翼が，打ち上げ時はただの“おもり”でしかないために，翼を軌道上にもっていくために，余分な推進剤を必要とすることもある．

何より最大の問題点は，一度帰ってきてからもう一度飛べるようにするための整備に，莫大な時間とお金を必要とするということだ．

たとえば，主エンジン SSME（図 4-3）は，地上に帰ってくるたびに分解して，1 mm 以下の小さなヒビも見逃さないような厳重なチェックを受ける．現在の技術では，何度も安心して運転できるロケット・エンジンはつくれない．喩（たと）えるなら，一度ドライブに出たら，全部分解して整備しなければならない自動車用エンジンのよう

なものである．

あるいは，機体下面全体に貼られている合計2万8000枚の耐熱タイルは，地上に帰ってくると一枚一枚厳しいチェックを行い，傷やはがれの有無を点検する．破損したものは即交換になるが，一つひとつ形の異なるタイルを人の手で削り出して交換している．

スペースシャトルは，飛行の度にこのように厳重なメンテナンスを受けて運行を維持しているのである．

それでは，機体の製造コストはどうだろう．

まずスペースシャトルは，再利用に耐えるために，そもそもかなりのコストをかけた複雑な構造になっている．「高いから再利用する」が最初の発想だが，「再利用を前提に設計したから高くなった」という側面が強い．

また，機体の製造コストからも再利用型は不利になる．1機の機体を何回も使うので，機体の数をそんなにつくらないからだ．機体全体がきわめて一品製作に近いので，どうしても製造コストが上昇してしまうのだ．ちなみにスペースシャトルの場合，滑空試験機の「エンタープライズ」，最初の機体「コロンビア」，以後「チャレンジャー」「ディスカバリー」「アトランティス」と続き，「チャレンジャー」が失われた後に代替機として製造された「エンデバー」を最後に製造が終了した．製造機数は6機．製造コストは，最終号機「エンデバー」の場合，18億ドル（約2340億円）だった．

一方，「ふじ」の製造コストは，コア・モジュールだけの場合，約8億円を目指していしている．拡張モジュールと推進モジュールを備えた標準型のコストはまだ算出していないが，スペースシャトルの製造コストである2340億円になることはないだろう．使い捨ての「ふじ」の場合，運用コストに機体の製造コストをそのまま上乗せすることになるが，打ち上げロケットの費用を考えても，スペースシャトルの運用コスト610億円を超えることはないと推定できる．

かたや，人間が搭乗するための最低限の設備を備えているだけで，1回の打ち上げで使い捨てられる「ふじ」，もう一方は7人の乗員が2週間以上滞在するための設備を備え，同時に30t近いペイロードも打ち上げ，帰還後は再利用するスペースシャトル．同列に論じるのは，スペースシャトルに対して不公平になってしまうが，「人間を宇宙に送り込む」という目的に絞って評価すると，「ふじ」がスペースシャトルよりも安く上がることは間違いない．

さらに，「ふじ」にはスペースシャトルにない強みもある．量産効果だ．同じものを大量につくると，一つ当たりの製造コストは下がっていく．「ふじ」の運用が軌道に乗って，大量に製造されるようになると，製造コストも下がっていくのだ．

ここでモデルとして，H-Ⅱロケットの製造コストに対して，三菱重工業が1988年頃に試算したコストを参照してみよう．当時，「H-Ⅱは商業打ち上げ市場に参入するには高すぎる」という議論の中で算出された量産効果は，年間2機打ち上げの場合，1機当たり180億円だった製造コストが，4機で140億円，8機で120億円になる，というものだった．そのまま「ふじ」に適用できるわけではないが，大まかにいって量産が進めば，7割程度にまでコストダウンできると見込むことは，さほど見当外れではないだろう．

現在の技術では，再利用しても宇宙への運用コストを下げることにはならないのである．

それでは逆に，どれぐらい技術が進歩すれば，機体を完全に再利用する，飛行機のような宇宙輸送システムを開発できるのだろうか．それを知るためには，少々の数式と物理学の知識が必要となる．とはいっても，高校の数学と理科レベルの話だ．

次の章では，ほんの少しの数式を使って，完全再利用型宇宙輸送システムの難しさについて考察してみよう．

第5章　ロケット・エンジンの限界
―届かない完全再利用型の夢―

この章では，47頁で述べた「②再利用可能な宇宙輸送システムを開発することは，原理的に不可能ではないが，きわめて難易度が高く，困難である」ことを説明する．以下，その理由をきちんと理詰めで考察していくことにする．

5・1　再利用型宇宙機を肯定的に考える

現時点で提案されている完全再利用型の宇宙機は，翼があるかないか，そして単段式か二段式か，さらにエンジンの燃焼に空気を使うか使わないか――この組み合わせで分類される．

(1)　単段ロケット式

大気中の酸素を利用するエンジンをもたず，機内に酸素または酸素に相当する酸化剤を搭載して，ロケット・エンジンのみを使う．帰還時は，翼を使ったり，ロケットを下に向けて噴射しつつ降りてくる．アメリカがかつて計画していた「ベンチャースター」や，アメリカ国防総省とマクダネル・ダグラス社が計画していた「デルタ・クリッパー」がこれに相当する．

(2)　単段式スペースプレーン

超音速の気流の中で燃料を燃やして噴射するスクラムジェット・エンジンを装備して，空気中の酸素を利用しつつ加速して地球をまわる軌道に入り，帰還時は翼を使って滑空して降りてくる．アメリカが1990年代に計画していた「NASP」や，日本の航空宇宙技術研究所のスペースプレーン構想がここに入る．

(3)　二段ロケット式

第1段も第2段もロケット・エンジンをもち，切り離し後の第1段は翼ロケットを噴射して帰還．軌道に到達した第2段も，同様にして地上に降りてくる．

(4)　二段式スペースプレーン

極超音速機の第1段に，ロケット・エンジンをもつ有翼の第2段を組み合わせる．マッハ4〜6の速度で第1段から切り離された第2段は，ロケット・エンジンで加速して軌道に到達，翼を使って帰還する．スペースシャトルの当初構想や，西ドイツ（当時）が1980年代の終わりから1990年代にかけて研究していた「ゼンガー2」がこの分類に入る．

このほかにも，軌道上からヘリコプターのようにローターをまわして帰還する「ロトン」のような色物構想もあったが，単段有翼型の変形と思えばよいだろう．

いろいろと複雑そうだが，こういう場合は，なるべく簡単なものから考えていくというのが正しいやりかただ．とりあえず「計算上だけでもロケット推進方式で，単段で完全再利用の機体をつくることができることを示す」ことを目標としてみよう．まずは，簡単なモデルで肯定的に考えるのである．

以下，若干の数式を使うことを許してほしい．といっても，内容は高校程度の数学で，けっして難しくはない．ロケットの基本原理は，高校程度の数学で計算することができるのだ．そして，その程度の計算でも，再利用可能な宇宙輸送システムを開発することの本質的な難しさを示すことができるのである．

5・2　ロケットは飛行機の100倍，自動車の1万倍

ボールを投げるといつかは地面に落ちる．力を入れて投げると，

遠くまでボールは飛ぶ．当たり前の話だ．

力を入れるということは，速くボールを飛ばすということだ．もしもボールをもっともっと速く投げられるとすると，ボールは地球の丸みにそって落っこちて，うんとうんと遠くに届くだろう．さらに，速く投げたならば，地球の丸みにそってどこまでも落ちながら，地球をまわることになる．人工衛星の誕生だ．

このときのボールを投げる速度が，地上から宇宙に出るためにどうしても必要な速度で，第一宇宙速度と呼ばれる．第一宇宙速度は，ニュートンの万有引力の法則から簡単に求めることができる．7.9 km/s だ．メートルに直して 7900 m/s．この速度を出してはじめて，物体は地球をまわる軌道に入ることができるのだ．

もっとも実際の打ち上げの場合には，空気抵抗があったり，重力損失というエネルギーのロスがあったりするので，だいたい 10 km/s の速度を出せるだけの能力が必要になる．秒速 1 万 m だ．使い捨てロケットだろうが，完全再利用型宇宙機だろうが，宇宙を目指す乗り物は，これだけの速度を出せないと，軌道上に到達することはできない．

この速度をほかの乗り物と比較してみよう．自動車や列車は，特別な記録用の車体でなければ，せいぜい時速 400 km 以下で運用される．わかりやすいように時速 360 km，秒速に換算して 100 m/s ぐらいと考えよう．

航空機ならば，どんなに早くてもマッハ 3 程度，大まかに秒速で考えると 1000 m/s ぐらいだ（マッハ数については 6・2 節参照）．航空機の歴史を見渡してみても，マッハ 3 を出せる飛行機は，そう多くはない．米ソ冷戦時代にアメリカがソ連領を偵察するためにつくった「SR-71」偵察機だとか，2 機だけつくられた「XB-70」バルキリー爆撃機だとか，ごくわずかだ．マッハ 3 という速度は，飛行機としてもべらぼうな高速と思ってほしい．

つまり，自動車が 100 m/s，飛行機が 1000 m/s．これらに対して，宇宙に行くには 1 万 m/s の速度が必要なのである．

さて，高校の物理の時間に習った，運動エネルギーと速度の関係を思い出そう．質量が同じならば，必要なエネルギーは速度の 2 乗に比例する．速度が 2 倍になれば，加速するためのエネルギーは 4 倍になる．10 倍の速度を得るためには，100 倍のエネルギーが必要だ．

マッハ 3 を出す飛行機と同じ重さの宇宙機を衛星軌道に到達させるためには，飛行機の 100 倍のエネルギーが必要になる．自動車と比べるならば，1 万倍ものエネルギーを使わなければいけないのだ．

要するに，地球をまわる軌道に入るためには，とてつもないエネルギーが必要なのである．

5・3　ロケットの推進性能を決めるツィオルコフスキーの公式

しかも，宇宙空間には空気も地面もない．そんな環境で加速を続けないと 1 万 m/s という速度は望めない．そこで使われるのがロケット推進だ．

自動車は，タイヤをまわして地面を押して前に進む．飛行機は，プロペラ機もジェット機も，前から空気を吸い込んで，勢いよく後ろに吹き出すことで前進する．どちらも「本体の外側にあるものを使って」前に進む，という意味では同じである．

一方，ロケット推進では，機体の中に搭載した燃料と酸化剤を燃焼させて，後ろに噴出して前に進む．燃料と酸化剤をまとめて推進剤という．専門的には英語の “propellant”（プロペラント）という言葉を使うことが多い．

ここで，自動車や飛行機と異なり，「全部を中にもっていなくてはならない」ことに注目しよう．加速する過程で，本体だけではなく「途中で噴射するためのプロペラント」をも加速してやらねばな

らないのだ．より速く飛ぶためには，たくさんのプロペラントを搭載しなくてはならない．しかし，加速の途中では，量が増えたプロペラントもろとも加速していかなければならない．だから，速く飛ぶためには，単純にたくさんのプロペラントを積めばよいというものではない．

この辺りの関係を初めて計算で示したのは，19 世紀末から 20 世紀前半に活躍したロケット工学の先達，コンスタンチン・ツィオルコフスキーだった．

下記の式(5.1)は，ツィオルコフスキーが導いたロケット推進に関する公式だ．ln（自然対数）が出てくるが，高校の数学や物理で理解できる，ごく簡単な式だ．ロケット工学の基礎というべき式である．

$$V = v \ln \frac{M}{m} \tag{5.1}$$

ここで V はロケットの最終速度（到達速度），v はガスの噴射速度，M は打ち上げ時の全質量，m は燃焼終了時の質量である．この単純な「ツィオルコフスキーの公式」に，ロケット推進の性能は支配されている．「工夫をすれば，よりいっそうの性能が出せるのではないか」などと考えるのは甘い．この公式は物理学が導くもので，設計上の工夫で変えることはできない．

ロケットもスペースシャトルも複雑なシステムだが，その基本は，球場で空を舞う細長い風船やロケット花火と同じように，「後ろに質量を噴出して進む」のだ．その働きは，この単純な数式で記述できるのである．

5・4 噴射速度と質量比 —ロケット推進の性能を決める二つの数字—

このツィオルコフスキーの公式の意味を実感するために，具体的な計算をしてみよう．

式(5.1)を少し変形すると，式(5.2)のような式になる．

$$\frac{M}{m} = e^{\frac{V}{v}} \tag{5.2}$$

ここで，v を液体酸素・液体水素の組み合わせで得られる 4500 m/s（この数字は，スペースシャトルの主エンジン SSME 並みの超高性能エンジンのみが出せる値だ），V を地球低軌道に入るのに必要な 10 km/s = 10000 m/s だとしよう．その場合の $\frac{M}{m}$ を求めると，式(5.3)が成立する．

$$\frac{M}{m} = e^{\frac{V}{v}} \fallingdotseq 2.718^{\frac{10000}{4500}} \fallingdotseq 9.22$$
$$\frac{m}{M} = \frac{1}{9.22} = 0.11 \tag{5.3}$$

この式が示しているのは，燃焼終了時の質量 m が全質量 M の 11 %（以下）にならないと地球低軌道に入ることができない，つまり，全質量の 89 %がプロペラント，残りの 11 %がロケット本体と打ち上げるペイロードということになる．

この簡単な計算は，単段式ロケットには完全に当てはまる．単段式スペースプレーンや単段式の再利用型ロケットも，この式からは逃げられない．この式を満足しないと，宇宙に行けるだけの機体をつくることはできないのである．

1 t のスポーツカーで 890 kg が燃料，残る 110 kg が搭乗者と自動車本体の質量という状態を思い浮かべてみよう．じつにとんでもない欠陥車だ．何しろ，人間が 2 人乗ったら本体は質量ゼロでつくらなければならないことになってしまう．しかしロケットでは，そこまでやらなければ宇宙には出られないのだ．

ツィオルコフスキーの公式をもう一度見直すと，2 個の変数が最終的な到達速度を決めているのがわかる．一つはガスの噴射速度，もう一つは打ち上げ時の全質量と燃焼終了時の質量の比だ．後者は専門用語で「質量比」という．簡単にいえば，「どれだけ軽い機体

に，どれだけたくさんのプロペラントを積むか」を示す数字といえる．

ロケットの性能向上とは，この二つの値をいかにしてよくするか，ということにほかならないのである．再利用であろうが使い捨てであろうが，性能向上のための条件は同じだ．より大きな噴射速度，より軽量の機体により大量のプロペラント，というのが高性能のための絶対条件なのである．

それでは，噴射速度と質量比の，現在の技術水準における相場はどれぐらいなのだろうか．噴射速度から調べてみよう．

5・5　限界に近づきつつある噴射速度の向上

現在のロケット・エンジンは，化学反応によって生じた熱エネルギーを運動エネルギーに変えて噴射する形式が一般的である．だから，より大きな熱エネルギーを発生する化学反応を起こす物質の組み合わせがプロペラントに向いているわけだが，ほかにも条件がある．

現在最高のプロペラントとされている液体酸素と液体水素の組み合わせがどのように反応するのかを，化学の反応式でみてみよう．理科で習ったはずの反応式だ．

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O + 572\,\mathrm{kJ} \qquad (5.4)$$

この式(5.4)の意味するところは，2 mol(＝4 グラム)の水素(H_2)と 1 mol（＝32 グラム）の酸素（O_2）が反応して，2 mol（＝36 グラム）の水蒸気（H_2O）と 572 kJ の熱エネルギーが発生する，ということだ．つまり，36 グラムの水蒸気を 572 kJ の熱エネルギーで加速して噴射することになる．

mol とか J といった単位，学生のときに習っているはずだが，思い出せただろうか．

mol（モル）は 6×10^{23} 個を表す単位で，1 mol は水素なり酸素な

りの分子が 6×10^{23} 個集まっているということだ．1 mol の分子は，その分子の分子量が n とすると n グラムになる．水素分子は分子量 2 だから，1 mol の水素分子は 2 グラムだ．酸素分子なら分子量 32 で，1 mol の酸素分子は 32 グラムとなる．

そして，J（ジュール）はエネルギーの単位だ．1 N（ニュートン）の力で物体を 1 m 移動させたときのエネルギーが 1 J と定義されている．kJ（キロジュール）は J の 1000 倍．「ニュートンって何だ？」という人は，1 cal（カロリー）＝4.2 J ということで，だいたいのところを実感してほしい．1 cal は 1 cm^3 の水の温度を 1℃上げるのに必要なエネルギーである．1 cm^3 の水の温度を 1℃上げるためには，4.2 J のエネルギーが必要になるわけだ．

ちなみに，ご飯は茶碗一杯でだいたい 840 kJ となる．2 グラムの水素が酸素と反応して燃えると，じつに茶碗半分以上のご飯に相当するエネルギーが発生するのである．

もう一度，水素と酸素の反応式をじっとみつめて考えてみよう．何となくよいプロペラントの条件が見えてくるはずだ．ロケットの性能向上に必要なのは，ツィオルコフスキーの公式からわかるように，噴射速度を大きくすることだ．そのためには，発生する熱エネルギーは大きい方がよい．そして，噴射するガスの分子量は小さい方がよいということになる．「軽いガスをより熱く」ということだ．

とはいえ，できれば常温で扱いやすい物質であった方がよいし，長い間タンクに詰めっぱなしにするような用途では，時間とともに変質しないということも重要な条件となる．さらには，噴射するガスが毒性をもっていると，地上では使いにくいことになるし，タンクへの注入操作も危険になる．

これらの問題をクリアして，現代のロケットに使われているプロペラントは，大きく分けて 5 種類ある．①液体酸素と軽油の一種であるケロシン，②ヒドラジンと四酸化二窒素，③ヒドラジンのみ

(ヒドラジンは触媒に作用させると分解して熱を発生する), ④液体酸素と液体水素, ⑤固体ロケットモーターに使われる過塩素酸アンモニウムとブタジエンゴムである. 表5-1に, これらのプロペラントの性能と特徴をまとめた. それぞれ適材適所に使い分けている.

中でもずば抜けて高い性能を発揮するのが, ④の液体酸素と液体水素の組み合わせだ. 液体水素は沸点が－253℃と非常に低温で, しかも比熱が小さいので蒸発しやすく, さらにはガスの分子が小さいのですぐに漏れるという, かなり扱いにくい物質だ. しかし, ほかのプロペラントに比べると圧倒的に高性能なので, 困難を承知の上で使われている.

ここでもう一度, 液体酸素と液体水素の反応式(5.4)に戻ろう.

噴射するためのガスの種類と量, そして発生する熱エネルギーが決まっているので, この反応で得られる噴射ガスの速度には上限が

表5-1　ロケットに使われる各種プロペラント

燃料と酸化剤	ガス噴射速度※	特徴
液体酸素と液体水素	4300～4600 m/s	極低温で扱いにくい. 高性能.
液体酸素とケロシン	3000～3600 m/s	比較的扱いやすい.
ヒドラジンと四酸化二窒素	2800～3300 m/s	常温で長期保管可能. プロペラントと噴射ガスの両方に毒性あり.
ヒドラジンのみ	2800～3000 m/s	触媒でヒドラジンを分解する. エンジンの構成が簡単になるので, おもに衛星の姿勢制御用スラスターに使用される.
ブタジエンゴムと過塩素酸アンモニウム	2500～2900 m/s	固体ロケット. ブタジエンゴムにはアルミニウム粉末を点火して燃焼温度を上げる. 構造が簡単になるが, 一度点火したら停止することができない.

※　ロケット・エンジンを利用した場合のガス噴射速度. 噴射速度は, ノズルが熱エネルギーを運動エネルギーに変換する効率にも左右されるので, 数値は目安である.

存在する．どんなに頑張っても，超えることができない壁があるわけだ．

もっとも，572 kJ の熱エネルギーがすべて噴射ガスの運動エネルギーになった場合が性能の限界というわけではない．もっとずっと低いところに限界が存在する．

まず，熱エネルギーを運動エネルギーに変換する場合には，熱力学第二法則による限界が存在する．「エントロピーは増大する」というやつだ．これはまさに物理学の示す，この世の根本的な法則の一つだから破ることはできない（わからない人は「とりあえずそういう限界がある」と思っておけばよい）．さらに，「噴射速度を大きくするためには，ガスの分子量が小さい方がよい」ということから，酸素と水素を完全に反応させるのではなく，やや水素を多めにして噴射ガスの中に水素を混ぜて，噴射ガスの平均分子量を下げてやった方が全体の性能が高くなる．

そんなこんなのさまざまな条件を考慮すると，液体酸素と液体水素の組み合わせによる噴射速度の理論的な上限は，約 4700 m/s となる．これ以上の噴射速度には，どんなにがんばってもできないのだ．

それでは，現在のロケット・エンジンはどこまで迫っているかといえば，スペースシャトルの主エンジン SSME が 4440 m/s，H-Ⅱロケットの第 1 段エンジン LE-7 が 4360 m/s という噴射速度を達成している．理論限界の 90 %を超える性能だ．たいへんに立派な成績であると評価しなければならない．機械には内部のエネルギー損失が付きものだ．理論的な限界の 90 %もの性能を出すということは，すでにかなり熟した技術といってよい．これ以上の性能向上は難しいというところまで，ロケット・エンジンの性能は煮詰められているのだ．

すでに，ぎりぎりまで性能を追求して工夫を重ねているのだから，

一層の性能向上は容易なことではない．100 m を 15 秒で走る人が 14 秒で走れるようになるのと，10 秒で走れる人が 9 秒 9 で走れるようになるのでは，後者の方がはるかに難しいのと同じである．

ここまでの議論は，化学反応を使うという条件付きだった．だから，化学反応以外を利用するロケットだと，より高い性能を出すことができる．

なかでもイオンエンジンは実用化もしている．キセノンのような希ガスをイオン化して，電界で加速して噴出するというものだ．電界を強くすれば，噴射するキセノンイオンの速度を速くすることができるので，噴射速度はじつに 3 万 m/s を超える．

ところがイオンエンジンは，その構造上大きな推力を出すことができない．mN（ミリニュートン．1 mN は 1 N の 1000 分の 1）単位の推力がせいぜいである．このため，地上からの打ち上げには使えず，静止衛星の軌道位置制御や，惑星間を航行する探査機に搭載して，長期の加速に使われている（イオンエンジンは 2003 年 5 月 9 日に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ」に搭載されている）．

そのほか，核融合ロケットや反物質ロケットなども考えられているが，どれも実用化にはほど遠い．当面，液体酸素と液体水素の組み合わせが，人類の使える最高のプロペラントということになる．結局 4700 m/s が噴射速度の上限で，現在のエンジンはすでに限界に迫りつつあるのだ．

5・6 今の技術の質量比ではペイロードが搭載できない

それでは，質量比の方はどうだろうか．

ここでは，H-ⅡA ロケットの第 2 段（図 5-1）の質量比をみて，現在の技術水準を実感してみよう．なぜ第 2 段をモデルにするかというと，第 2 段の方が軽量化に重点を置いた設計をしており，現在

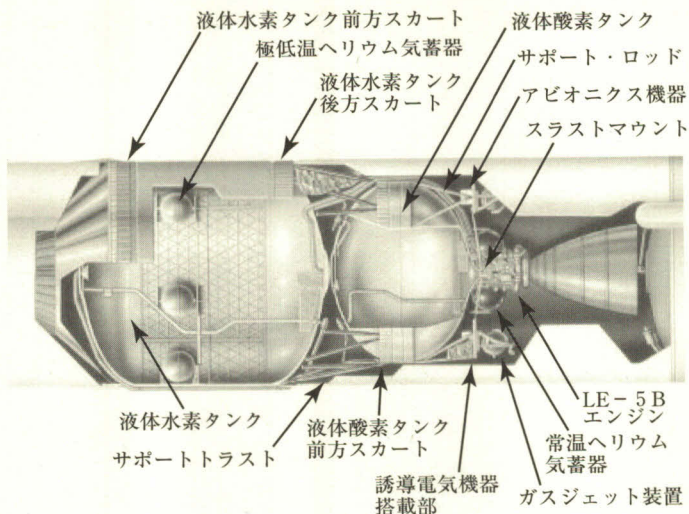



図5-1　H-ⅡAロケット第2段の構造図（資料提供：NASDA）

の軽量化技術の到達点を知るのに都合がよいからだ．第2段はペイロードを軌道に投入する最後のロケットなので，第2段を軽くすると，その分ペイロードを増やせるのである．第2段が1kg軽くなれば，1kgペイロードを増やせるのだ．

第2段ロケットは，宇宙空間に出てから使われるので，エンジンのノズルが宇宙空間用になっているなど，いろいろと地上から使う第1段とは違う部分がある．あくまで単段式の完全再利用型宇宙機を検討するためのモデルとして，大まかな“あたり”を付けるための叩き台として検討していこう．

H-ⅡAの第2段は全質量が19.6t，そのうちプロペラントが16.6t，本体質量が3t．そして先端には，ロケットを打ち上げるそもそもの目的であるペイロードが搭載されている．地球低軌道への打ち上げなら10t，静止トランスファー軌道への打ち上げなら4tのペ

イロードが第2段の先頭に付いているのだ．この分を考慮すると，質量比$\frac{M}{m}$は下記の式(5.5)のようになる．

$$\frac{16.6+3+10}{3+10} \quad (\text{地球低軌道})$$
$$\frac{16.6+3+4}{3+4} \quad (\text{静止トランスファー軌道}) \qquad (5.5)$$

それぞれ計算すると，地球低軌道への打ち上げだと質量比は2.28，静止トランスファー軌道への打ち上げだと3.37だ．一方，エンジンであるLE-5Bの噴射速度vは4410 m/s．これらの数値から，ツィオルコフスキーの公式で到達速度Vを求めると，3.6 km/sと5.4 km/sとなる．いずれにせよ，地上から地球低軌道に到達するのに必要な10 km/sには全然足りない．

実際のH-ⅡA打ち上げでは，足りない分を第1段と固体ロケットブースターが担当しているわけだ．

さてここで，まったくペイロードを搭載せずに第2段だけだったら，どこまで加速できるかを計算してみよう．

この場合の質量比$\frac{M}{m}$は $19.6 \div 3 = 6.53$ になる．

この数字をツィオルコフスキーの公式に当てはめて到達する速度を計算したのが式(5.6)だ．

$$4410[\mathrm{m/s}] \times \ln 6.53 = 8275[\mathrm{m/s}] \fallingdotseq 8.3[\mathrm{km/s}] \qquad (5.6)$$

おお，8 km/s以上の速度が得られるではないか．10 km/sには足りないけれども，なかなかよいところまで来ているのでは，と思える．

そこで，もう一歩進んで，逆に10 km/sを出すためには，第2段をさらにどの程度軽量化すればよいかを計算してみよう．

LE-5Bの噴射速度は4410 m/s．このとき到達速度を10 km/sとするための質量比は式(5.7)，これを変形すると式(5.8)になる．

$$10000[\mathrm{km/s}] = 4410[\mathrm{k/m}] \times \ln \frac{M}{m} \quad (5.7)$$

$$\frac{M}{m} = e^{\frac{V}{v}} \doteqdot 2.718^{\frac{10000}{4410}} \doteqdot 9.66 \quad (5.8)$$

19.6 t という第 2 段の全質量を変えないとして，質量比が 9.66 を突破するには，$m = M \div 9.66 = 19.6 \div 9.66 = 2.03$.

本体質量を，現在の 3 t から 2.03 t まで軽量化する必要がある．

これは並たいていのことではない．ただでさえロケットは軽量化に軽量化を重ねて，ぎりぎりの設計をしているのだ．それをさらに 3 分の 2 にしろというのは，よほどのことがないと無理だ．

しかもこの計算では，「ペイロードは積まない」ことになっている．実際には，打ち上げるペイロードを搭載しなければならないから，もっと軽量化しなくてはならない．たとえば，1 t のペイロードを積もうと思ったら，本体質量は 2.03 t から 1 t を引いた 1.03 t にまで軽量化しなくてはならない．3 t のものを 1.03 t まで軽量化するには，何か設計上の根本的な革新が必要だろう．

さらに，完全再利用を目指すなら，このぎりぎりまで削られた質量の中に，地上に帰ってくるための仕組みをも組み込まなくてはならない．スペースシャトルのように滑空して地上に帰ってくるならば，翼に相当する分の質量を見込んでおかなくてはならないのである．

物理学の法則から導かれるツィオルコフスキーの公式に，逃げ道はない．単段式完全再利用型の宇宙機を目指すならば，このような厳しい条件をクリアしなくてはならないのだ．

5・7　完全再利用型を目指して

ここまでの議論をまとめると――

①地球をまわる軌道に入るためには，10 km/s の速度が絶対必要である．

②ロケット推進を使った輸送機の最終到達速度は，噴射速度と質量比のみで決まる．

③化学反応を利用する限り，噴射速度は現状でほぼ限界に近づきつつある．

④その噴射速度と現状の技術による質量比では，単段式で宇宙に出ていくには足りない．

ということになる．

何とかして単段式の完全再利用型宇宙機を成立させるためには，濡れタオルを絞るような努力をして，噴射速度と質量比を向上させなくてはならない．もしかすると，どんなにがんばっても，物理的に単段式の完全再利用型宇宙機は実現できないのだろうか．

そこでまたちょっと計算をしてみる．ただし，そろそろツィオルコフスキーの公式の使い方にも慣れてきたと思うので，表計算ソフトを使って，一気にさまざまな噴射速度に対する質量比の関係を求めてみよう．結果が表5-2だ．10 km/s の速度を出す場合の噴射速度と質量比の関係である．ついでに，H-ⅡA 第2段に適用した場合の，軽量化の割合も計算してみた．もちろん，この軽量化が実現したとしても，ロケットが軌道上に行くだけで，ペイロードが一切搭載できないということは心に留めておかなくてはならない．

表5-2をみると，噴射速度が理論的限界の 4700 m/s になったとしても，なおかつ本体を現状より 22％も軽量化しなければいけないことがわかる．単段式の再利用型宇宙機を実現するためには，なんとしても本体質量を軽量化しなければならないのだ．

軽量化の一番確実な手段は，材料を軽いものに変えることだ．H-ⅡA 第2段は基本的にアルミ合金でつくられている．思い切って素材をより強くて軽いものに変えれば，いけるのではないだろうか．

そのような素材も存在する．炭素系複合材料だ．ゴルフのシャフトや釣り竿などにも使われている新素材だ．

表 5-2 H-IIA 第2段に適用したときに，10 km/s の到達速度を出す場合の噴射速度と質量比の関係

噴射速度 (m/s)	質量比	10 km/s に到達可能な本体質量 (kg)	現在の第2段構造質量との差 (kg)
1000	22026.47	0.89	2999.11
1500	785.77	24.94	2975.06
2000	148.41	132.06	2867.94
2500	54.60	358.99	2641.01
3000	28.03	699.21	2300.79
3500	17.41	1125.68	1874.32
4000	12.18	1608.87	1391.13
4410※1	9.66	2029.84	970.16
4500	9.23	2124.01	875.99
4700※2	8.40	2334.67	665.33
5000	7.39	2652.57	347.43
5500	6.16	3181.48	−181.48※3
6000	5.29	3701.96	−701.96※3

※1 LE-5B エンジンの噴射速度.

※2 液体酸素・液体水素による噴射速度の理論的限界.

※3 マイナスは「現在の第2段を軽量化せずともこれだけのペイロードが積める」という意味.

残念ながら，材料の置き換えは高校程度の数学では計算できない．アルミ合金の素材を炭素系複合材料に置き換えて同じ強度を維持した場合に質量がどうなるかという検討は，構造力学的な計算を必要とするプロの領域だ．

5・8 NASDAの「ロケットプレーン」

ここから先は，プロの技術者が行った検討結果を参照しつつ考察していくことにしよう．モデルとなるのは，宇宙開発事業団（NASDA）が1997年に検討した単段式再利用型宇宙輸送システム「ロケットプレーン」（図5-2）．その資料を紹介しながら考察していこう．

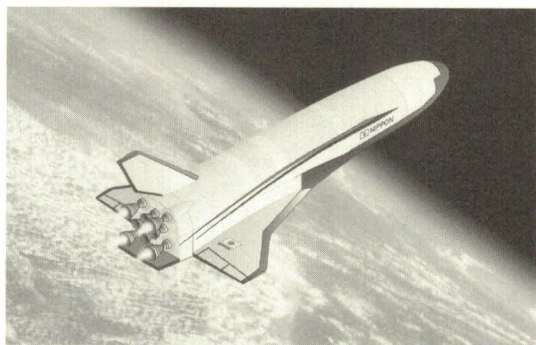



図 5-2　「ロケットプレーン」の想像図（画像提供：NASDA）

「ロケットプレーン」は垂直に打ち上げ，帰還は翼を使って水平に飛行場へ着陸するというシステムだ．打ち上げ時の質量は 500 t で，10 t のペイロードを打ち上げる能力がある．エンジンは H-II ロケット第1段に使われていた LE-7 系統のエンジンを改良したものを 8 基使うことになっている．

「ロケットプレーン」の基本構想は，たいへんに優れているといえるだろう．今ある技術を最大限に活かし，システムをいたずらに複雑化させずにシンプルな仕組みで単段式再利用型宇宙機を実現している．ただし，それもツィオルコフスキーの公式を満たして，本当に宇宙に行けるのならば，だ．NASDA のプロたちはどのような検討を行っているのだろうか．

LE-7 エンジンの噴射速度は 4360 m/s だ．「ロケットプレーン」に LE-7 を使うと仮定し，ツィオルコフスキーの公式を当てはめると，機体とペイロードが 50 t，ペイロード抜きの機体質量は 40 t となる．ところが NASDA の検討によると，現在のアルミ系合金を使って機体を製造すると，機体質量が性能から要求される値よりも約 34 %も重くなってしまうのだ．これではペイロードが載らない

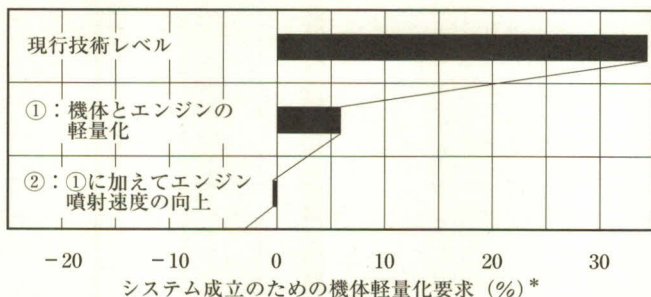



図5-3　「ロケットプレーン」実現のために必要な技術的条件
* 積算値／要求値.

どころか，何も積まなくとも宇宙には行けない.

そこでNASDAでは，①機体とロケット・エンジンの軽量化，②LE-7エンジンの噴射速度を約100 m/s向上させる，という2点をクリアできれば，10 tのペイロードを搭載できるようになると試算している（図5-3）．この2個の課題さえクリアできれば，単段式再利用型の翼をもつ機体がつくれるのである.

ところが，この条件が実際問題として，とてつもなく難しいのだ.

まず機体の軽量化．確かに炭素系複合材料を使えば，「ロケットプレーン」の要求に応えられるほど機体を軽量化できる．しかし，「ロケットプレーン」の機体は，内部に充填する−253℃もの液体水素の低温に耐え，同時に再突入時にかかる荷重にも耐え，しかも何回も使えるようでなくてはならない．現状の技術では，複合材料は液体水素の低温に耐えられず，割れてしまう．後述するアメリカの次世代シャトル実験機「X-33」は，複合材料製のタンクで軽量化を狙ったが，どうしてもこの問題が解決できず，機体開発は中止された.

もちろん，地道な技術開発の積み重ねで，いつかは液体水素の温

度にも再突入時の加重にも耐え，何回も使える複合材料もつくれるようになるだろう．とはいえ，まだできていない技術をあてにして今から宇宙機の開発を進めるので，当然リスクは高い．

エンジンの噴射速度向上も一見簡単そうに見える．LE-7の噴射速度の4360 m/sを，たった100 m/sだけ上げてやればよいのだ．

だが，ここまでいろいろと検討してきたことから，この要求がいかに大変なことかがわかるだろう．すでにほぼ限界に来ているエンジンの噴射速度を少しだけ向上させることが，いかに難しいことか．しかも，軽量化と再利用に伴う構造強化を両立させながら実現しなければならないのだ．

もちろん，たとえばスペースシャトルの主エンジンSSMEの噴射速度は約4500 m/sあるので，「ロケットプレーン」の要求を満足することができる．しかもSSMEは，現在再利用を実際に行っている．だから，そんなエンジンが開発できないということはない．

しかし，アメリカはSSMEの開発に大金をつぎ込んだ上，スペースシャトルが運航を開始してからもトラブルが続発し，延々と綱渡りの改良作業を続けなくてはならなかった．再利用にしても，初期には主要部品を根こそぎ交換するほどの整備を行って，やっと達成しているという状態だった．その道に踏み込むのが技術開発として正しい行き方なのかは，多分に疑問が残る．

表5-3に，上記条件をクリアした「ロケットプレーン」の質量配分を示す．エンジンの噴射速度が向上しているので，機体質量は51.8 tとすることができる．それでも厳しい機体の質量制限の枠内で，翼に機体質量の1割を超す約6 t，着陸脚に2 tもの質量を割かなければならない．翼をもつ再利用システムを現実のものとする困難さが見てとれるだろう．

表 5-3　「ロケットプレーン」の機体質量内訳
（資料提供：NASDA）

機体構造	前部胴体	1,040 kg
	ペイロードベイ	5,090 kg
	後部胴体	1,350 kg
	エンジンセクション	1,310 kg
	翼構造	6,000 kg
	液体水素タンク	2,160 kg
	液体酸素タンク	4,010 kg
熱防御系		5,230 kg
推進系	エンジン	10,660 kg
	コンポーネント	4,580 kg
補助動力系（含 RCS 推進薬）		5,050 kg
誘導制御系（含アクチュエーター）		1,660 kg
計測通信系		240 kg
電　池		1,120 kg
着陸脚		2,000 kg
システム余裕		290 kg
機体空虚質量		51,790 kg
ペイロード質量		10,000 kg
推進剤質量		438,210 kg
合計質量		500,000 kg

5・9　次世代シャトル実験機「X-33」

もう一つ，ロケット・エンジンによる単段式完全再利用型の例を見てみよう．アメリカの「X-33」だ（図 5-4）．「X-33」自体は，本番の単段式完全再利用型宇宙機「ベンチャースター」のための実験機であり，宇宙に出ていく能力はなかった．「ベンチャースター」に使う新しい技術を試験するための機体だったのだ．

「ベンチャースター」は，NASA がスペースシャトルの後継機として，早ければ 2004 年から運用しようとしていた機体だ．1997 年 7 月に，ロッキード・マーチン社，ロックウェル・インターナショナル社，マクダネル・ダグラス社の提出した 3 個の案の中から，ロッ

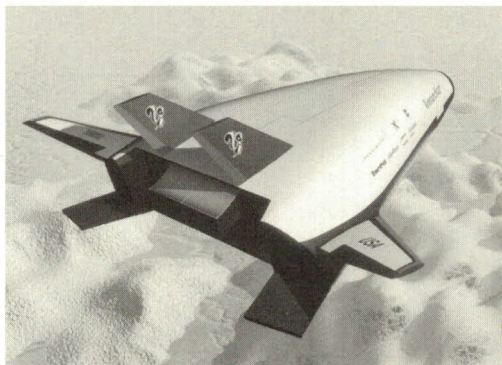



図 5-4 「X-33」の想像図（画像提供：NASA）

キード・マーチン社の，完全再利用可能な垂直離陸／水平着陸型の三角おむすびのような形状のリフティングボディー案が選ばれ，そのための実験機「X-33」の開発が決定した．開発の主体になるのは，スパイ機「U-2」，マッハ 3 の超高速偵察機「SR-71」，ステルス戦闘機「F-117」などの軍用機開発で輝かしい実績をもつ同社の技術者集団スカンクワークス．それだけに「X-33」と「ベンチャースター」への期待は非常に高かった．

「ベンチャースター」は，全備質量は 990 t，地球低軌道に約 22.6 t とスペースシャトルに近いペイロードを打ち上げる能力をもつ．目標通りの性能が出せるならば，スペースシャトルの半分の質量で同等のペイロード搭載能力があり，しかも完全に再利用できるシステムとなるはずだった．

単段式で宇宙への進出を可能にするための新技術は 2 種類，リニアスパイクノズルによる噴射速度の向上と，炭素系複合材料による機体の軽量化だった．これらを実際に試すために，「ベンチャースター」の 2 分の 1 スケールの「X-33」が計画されたのである．

ここまで本書をきちんと読んできた人は，「ちょっと待て」と怒るかもしれない．「リニアスパイクノズルって何だ．お前はさんざん『噴射速度の向上はとても困難』と書いてきたではないか」と．

そう，じつは噴射速度の向上のためには，秘密兵器があったのだ．リニアスパイクノズル——その秘訣（ひけつ）は「ノズルの効率の向上」である．

ロケット・エンジンの説明のところで，熱エネルギーを運動エネルギーに変えてガスを噴射すると説明した．この「熱エネルギーを運動エネルギー」に変えるための部品がノズルである．ロケットの後端に付いている，ガスを吹き出す釣り鐘型の部品がノズルだ．

ノズルの構造は図5-5のような単純なものだ．燃焼室でプロペラントが燃焼して高温ガスが発生し，一番ノズルの狭まった部分（スロート=「喉」という）を通過して拡がっていく過程で，温度と圧力が下がると同時に速度が上がる．熱エネルギーが運動エネルギーに変換されるわけだ．

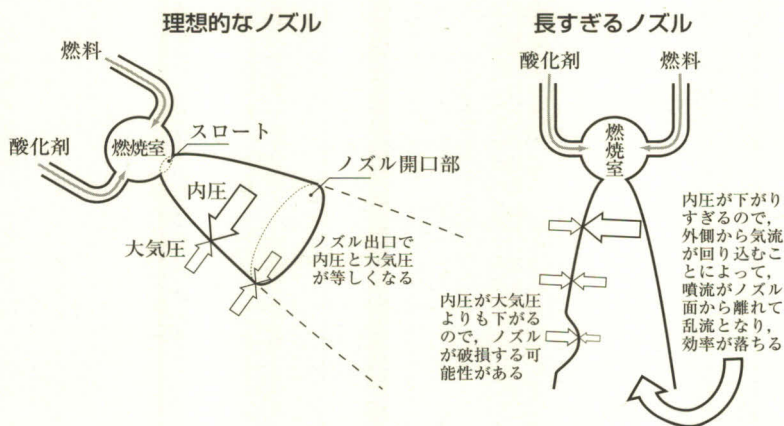



図5-5　ロケット・エンジンのノズルの構造（イラスト：撫荒武吉）

きちんと説明しようとすると，大学工学部の専門課程で学ぶ熱力学の知識が必要になるので，結論だけを書こう．ノズルの効率は，スロートのところの断面積と出口（ノズル開口部）のところの断面積の比（開口比という）と，燃焼室圧力と外気の圧力（外気圧）の比が大きいほど高くなる．しかし，あまり大きなノズルだと，中を流れるガスの圧力が外気よりも低くなり，ノズルは外気圧に耐えられずにへこんでしまう．そうならなくても，外気がノズルに流れ込んで気流の乱れをつくり出し，著しく効率を下げてしまう．だから，ある外気圧の環境で最適なノズルは，開口比が燃焼室圧力と外気圧の比に等しくなる．ノズルにはそういう性質があるのだ．

もうわかっただろう．地上は1気圧，宇宙は真空，だから地上から宇宙までの全領域で最大効率になるノズルは存在しない．

実際のロケットでは，第1段のロケット・エンジンは，すぐに空気の薄い高空に昇るので，地表でノズルが破損しない程度のぎりぎり大きなノズルを付ける．第2段は，おもに宇宙空間で動作するので，なるべく大きなノズルを装着している．途中でエンジンが切り替わるので，そこで開口比を調整しているわけだ．ちなみに，H-ⅡAロケット第1段用エンジンLE-7Aと第2段用エンジンLE-5Bを比較すると，エンジンの推力ではLE-7AはLE-5Bの約10倍も強力なのだが，ノズルの大きさはほぼ同じである（図5-6）．

単段式では，地上から宇宙まで同じエンジンを使うことになる．となると，ノズル効率の問題は避けることはできない．

スペースシャトルの主エンジンSSMEでは，燃焼室の圧力をうんと高くすることで対処している．燃焼室圧力が高ければ外気圧との比が大きくなり，結果として開口比の大きい効率の高いノズルが地上から使えることになる，という理屈だ．通常第1段エンジンの燃焼室圧力は100〜130気圧ぐらいなのだが，SSMEの燃焼室には200気圧もの圧力がかかっている．当然エンジン各部に大きな負荷

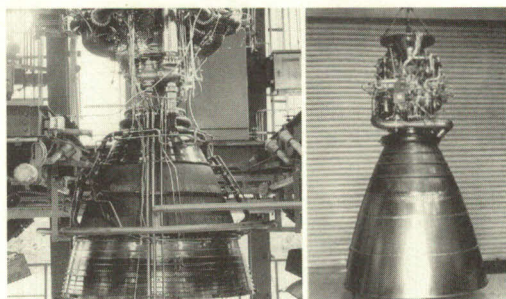



図 5-6　LE-7A（左）と LE-5B（右）（写真提供：NASDA）

がかかるわけで，実際 SSME は長い間トラブルが耐えなかった．

前述した NASDA の「ロケットプレーン」は，8 基の LE-7 エンジンのうち 4 基に，途中で後ろに延びて開口比を大きくする進展ノズルという仕組みを採用することを考えていた．進展ノズルは宇宙空間で使うロケット・エンジン用に，限られたロケットの容積の中になるべく大きなノズルを搭載する技術として，すでに確立している．なかなか現実的な解といえる．

さて，第三の方法がリニアスパイクノズルだ．これは図 5-7 を見てもらった方が早いだろう．リニアスパイクノズルは，ノズルの形に曲がった 1 枚の板である．そこに沿ってガスを吹き出すと，外気圧が噴射ガスを押すことで仮想的なノズルが形成される．外気圧が下がるとこの仮想的なノズルは拡がり，開口比が大きくなる．つまり，外気圧に応じて最適な開口比が自動的に実現できるのである．ちなみに，「ベンチャースター」のためにアメリカのロケットダイン社が開発する予定だった RS-2200 エンジンは，リニアスパイクノズルで得られる余裕を，性能向上ではなく，エンジン各部の安全性を大きくとるために使う設計になっていた．

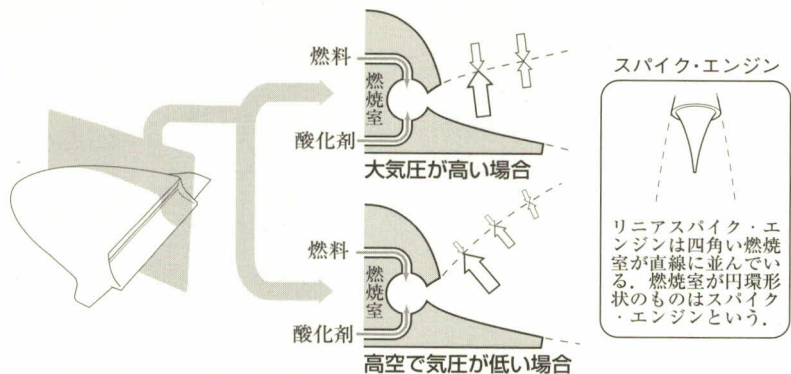
もちろん，計算ではうまくいきそうでも，実際やってみたらどう

気圧が低くなると，噴射ガスが大きく拡がって実効的なノズル開口比が大きくなる．

図 5-7　リニアスパイクノズルの仕組み（イラスト：撫荒武吉）

なるかはわからない．そのためにも「X-33」が実際に飛んで，データを収集する予定になっていた．早ければ1998年にも「X-33」は初飛行を行うはずだった．

しかし，リニアスパイクノズルがその有効性を立証することはなかった．2001年3月，「X-33」計画は中止になり，「ベンチャースター」も消えた．もう一つの新技術，炭素系複合材料を全面的に採用した機体構造が問題を起こし，どうしても解決できなかったのである．

問題は液体水素タンクで発生した．タンク内に液体水素を注入する試験で，タンクに亀裂が発生したのである．液体水素の温度は－253℃．そのあまりの低温に材料が耐えられなかったのである．ロッキード・マーチン社は，どうしてもこの問題を解決することができなかった．最後には，炭素系複合材料をあきらめて，炭素系複合材料ほどではないがアルミ合金よりは軽いアルミ・リチウム合金を使うことにして機体構造の見直しを行ったが，とうとう性能的に

要求されるだけの軽量化を達成することができず，計画は中止された．

中止になった時点で，「X-33」にはNASAとロッキード・マーチン社が合計12億6900万ドル（約1650億円）もの予算をつぎ込んでいた．H-ⅡAロケットの開発費1100億円よりはるかに多い額である．

5・10　切り札は材料 —カーボンナノチューブは未来を拓くか—

それでは逆に，どのような技術が，再利用型宇宙機を実現する鍵となるのだろうか．答えは材料である．液体水素の低温と再突入時の空気摩擦による高温に耐え，なおかつツィオルコフスキーの公式を満足するほど軽量な機体をつくれる材料ができれば，ロケット・エンジンを使った単段式完全再利用型の機体をつくることができる．

「ふじ」を検討する過程で，そのような材料が実際にできるかどうかということも議論した．有力な候補として浮上したのが，カーボンナノチューブだ．

カーボンナノチューブは，炭素原子が集まってつくる，ごくごく細い筒だ．太さが数nm（ナノメートル．1 nmは1 mの10億分の1）なのでこう呼ばれる．NEC主席研究員の飯島澄男氏が，1991年に電子顕微鏡で実験試料のススを観察していたときに発見した．

カーボンナノチューブには，非常に引っ張り強度が高いという特徴がある．なかには，「これ以上の素材を人類はつくり出せないだろう」という研究者もいるほどの究極の材料である．現在の技術では，せいぜい1 μm（マイクロメートル．1 μmは1 mの100万分の1）程度の短いものしかつくれないが，もしも十分な長さのカーボンナノチューブを製造することができれば，とてつもなく軽く丈夫な構造材をつくることができるだろう．

カーボンナノチューブの市場規模は，近い将来，数百億円から数

千億円まで伸びるとも言われており，現在世界中の研究者が効率的により長いカーボンナノチューブを製造する方法を求めて日夜研究を続けている．2002年5月には，アメリカのレンセラー工科大学と中国の清華大学の研究グループが，長さ20 cmのカーボンナノチューブの合成に成功したが，まだ完全に1本のチューブではなく，実用に耐えるほどの強度がないらしい．とはいえ，世界中で激しい研究開発競争が続いているので，近い将来に再利用型宇宙機に使うのに十分な強度と長さをもつカーボンナノチューブが製造できるようになるかもしれない．

ここで気を付けなければいけないのは，カーボンナノチューブの実用化がすぐに完全再利用型宇宙機の開発につながるというわけではない，ということだ．まず，カーボンナノチューブを使ってカプセル型宇宙船や，使い捨て型のロケットをつくった場合との，費用対効果を比較しなければいけないだろう．それに勝ったとしても，今度は「カーボンナノチューブが可能にする，もっと効率的な宇宙への輸送システムはないか」ということを考察しなければならない．

そのような未来宇宙輸送システムは，すでに検討されている．軌道エレベーターだ（図5-8）．軌道エレベーターというのは，地球の赤道上空3万5800 kmの静止軌道から，ロープを地表まで垂らしてエレベーターをつくり，エレベーターで宇宙に行ってしまおう，という途方もない巨大構造物だ．現代技術が目指す「ジャックと豆の木」の“豆の木”といえるものだが，縄ばしごのように軌道上からつるすというところが，下から生える豆の木とは異なる．

軌道エレベーターでは，降りてくるカゴで発電をし，その電力を下から昇るカゴの動力に使うというやりかたで，ほとんどエネルギーの損失なしに宇宙へと行くことができる．完成すれば，再利用型宇宙機どころではない，低コストな宇宙輸送システムとなるだろう．

地球の直径は約1万2750 kmだ．その3倍近い長さのエレベー

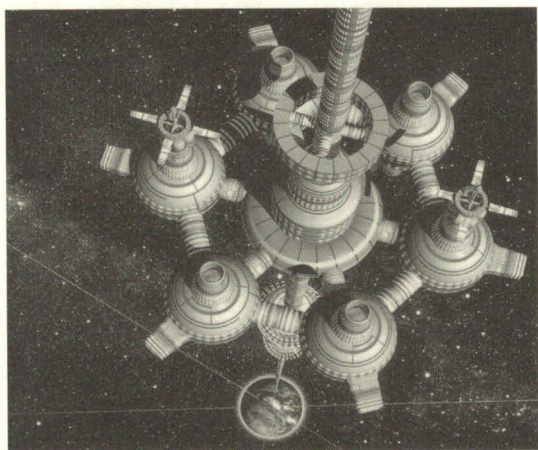



図 5-8　軌道エレベーターの想像図（イラスト：長谷川正治）

ターをつくることなど夢物語のように思えるかもしれない．しかし，軌道エレベーターは大まじめな宇宙工学的な課題であり，建築方法や最適な建築場所，さらには崩壊したときにどんな危険が考えられるかまで，さまざまな検討がすでに行われている．ちなみに，SF 界の巨匠アーサー・C・クラークは，1979 年に発表した長編小説『楽園の泉』で，軌道エレベーターの建設過程をリアルに描いた．

軌道エレベーターをつくるには，現在の技術では考えられないほどの引っ張り強度をもつ材料が必要なのだが，計算上は 3 万 5800 km もの長さの 1 本につながったカーボンナノチューブがつくれれば，建築は不可能ではない．

実際問題として，再利用型宇宙機と軌道エレベーターのどちらを開発するべきかというのは，そのときの技術水準や社会状況によって変わるだろう．ただ，材料の進歩がすぐに再利用型宇宙機の開発につながるわけではないということは頭に入れておくべきだろう．

第6章　大気中の酸素を使え
—スペースプレーンは希望になるか—

6・1　飛行機のように離陸し，飛行機のように着陸する

第5章で検討してきた機体は，すべてロケット・エンジンを使っており，ツィオルコフスキーの公式に縛(しば)られていた．ならば，ロケット・エンジン以外の推進方式で，この限界を打破してみてはどうだろうか．

これがスペースプレーンの基本戦略だ．酸化剤を機体の中に抱え込んでいくかわりに，大気中の酸素を利用しようというのだ．そうすることで，機体を軽くできるし，また機体の外側にある空気を噴射ガスに使うことで，吹き出すガスの質量が増えるので，見かけ上の噴射速度を上げることができる．

スペースプレーンは，航空機と同様に水平に離陸する．水平離陸してかなり長時間大気圏を飛行し，大気の中の酸素を利用しつつ速度を上げていく．そして，最後に地球を巡(めぐ)る軌道に到達するのだ．まさに航空機がそのまま宇宙に出ていくという形式である．当然，帰還時もスペースシャトルのように翼を使って着陸する．この方式なら間違いなく，現在の旅客機に乗れる人ならば搭乗することができるだろう．まさに夢の乗り物だ．

そのためのエンジンは，エアブリージング・エンジン（空気吸い込み型エンジン）と総称されている．自動車や航空機のエンジンはすべて空気を吸い込むから，「何をいまさら」の呼び方だが，プロペラント（推進剤）を全部内部に抱えていくロケット・エンジンとの対比で，こう呼ばれているのだ．

6・2　鍵となる技術はスクラムジェット・エンジン

単段式スペースプレーン実現の鍵ともいうべきエンジン形式，それはスクラムジェット（scramjet）・エンジンである．「スクラム」とは「円陣」のことではない．頭につく「スク（sc）」は，「supersonic combustion（超音速燃焼）」の略で，超音速燃焼ラムジェット・エンジンのことだ．

スクラムジェット・エンジン研究の歴史は長い．その可能性が指摘されたのが1950年代．1960年代に入ってから，アメリカを中心にして地上試験が行われるようになった．50年近くに渡って研究が続けられているのである．

スクラムジェット・エンジンの原理を，航空機用のジェット・エンジンと比較して説明しよう．図6-1に，通常のジェット・エンジン（ターボジェット・エンジン），ラムジェット・エンジン，そしてスクラムジェット・エンジンの構造を比較して示そう．

ターボジェット・エンジン（図6-1a）は，吸い込んだ空気をまず圧縮ファン（コンプレッサー）で圧縮し，燃料を吹き込んで燃焼させて噴射する．噴射の途中にタービン（羽根車）が入っており，圧縮ファンを駆動する動力を取り出している．

一方，ラムジェット・エンジン（図6-1b）は，見ての通り，ごく単純な筒に燃料を吹き込む噴射器（燃料ノズル）と燃焼を継続的に起こすための火炎保持器が付いただけである．圧縮ファンがないのにどうやって空気を圧縮するのだろうか．

団扇（うちわ）を力一杯振り回すと，団扇に空気がぶつかってたわむ．このとき団扇の表面の気圧は高くなっている．団扇に限らず，空気中を高速で移動する物体の正面では，気圧が高くなる．この圧力のことを「ラム圧」という．ラムジェット・エンジンは，このラム圧を空気の圧縮に利用する．高速で飛行する航空機では，ラム圧も大きくなる．ラムジェット・エンジンに吸い込まれた空気は，ラム圧でぐっ

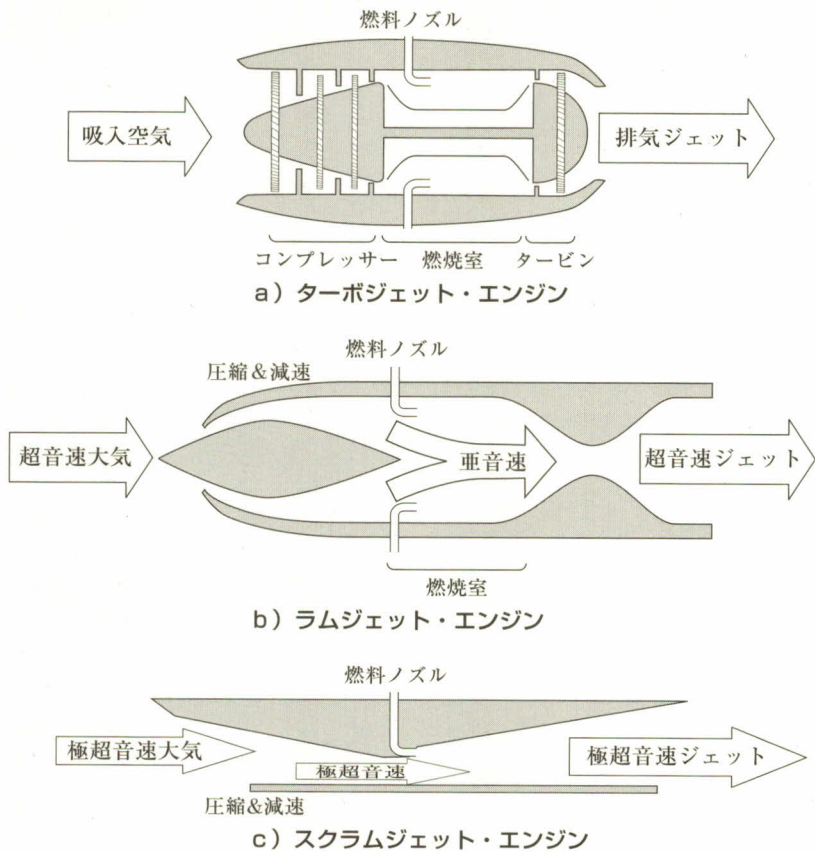



図6-1　ターボジェット・エンジン，ラムジェット・エンジン，スクラムジェット・エンジンの構造（イラスト：撫荒武吉）

と圧縮される．そこに燃料を吹き込んで燃やし，発生したガスを噴射することで推力を得るのである．

動作原理からわかるように，ラムジェット・エンジンは高速飛行時にしか使えない．ラムジェット・エンジンを搭載した航空機は，

別のエンジンを使うか，別の飛行機に運んでもらわなければ離陸できないし，ラムジェット・エンジンを点火できない．

そんなラムジェット・エンジンの利点は，ターボジェット・エンジンよりも高速で使えるということだ．

このことを理解するためには，「音速って何？」「超音速ってどういうこと？」を理解しなければならない．

空気中を音が伝わる速度が音速だ．音速は温度で変化するが，14℃のときに 340 m/s である．この音速を「マッハ 1」という．音速の 2 倍ならばマッハ 2，3 倍ならマッハ 3 になる．航空機の世界ではよく使う単位だ．

音速は，「空気という媒質を，物理現象が連続的に伝わる速度」だ．だから，物体や気流の速度が音速を超えると，物理現象の表れ方が一変する．翼が浮かぶ力（揚力）を発生するメカニズムも変わるし，羽根車が空気を押しやる仕組みも一変する．音速以下の流れで使うように設計された翼や羽根車は，超音速の流れの中では役に立たなくなる．

ターボジェット・エンジンは，圧縮ファンやタービンといった羽根車を使う．だから，羽根車に対する空気やガスの流れが超音速になると使えなくなってしまう．羽根車はまわっているから，羽根車と流れとの間の相対的な速度は，羽根の回転速度と流れの速度とを合成したものになる．機体の飛行速度がマッハ 1 になる前に限界がくるのだ．

一方，ラムジェット・エンジンは，燃料を吹き込む噴射器付近の流れが音速以下でありさえすれば動作する．ラム圧で空気を圧縮するということは，気流の運動エネルギーを圧力に変えるということだから，かなり高速になるまで燃焼器に流入する気流の速度は音速以下に保つことができるのだ．だいたいマッハ 5，音速の 5 倍ぐらいの速度までラムジェット・エンジンは使える．このため，ラムジェッ

ト・エンジンは1950年代にさかんに研究され，研究機の飛行試験なども行われた．

しかし，その後，ジェット・エンジンの空気取り入れ口や噴射口の技術の進歩，さらにはアフターバーナーという緊急加速装置の出現で，ターボジェット・エンジンでもマッハ3程度の高速性能が出せるようになってしまった．空気取り入れ口で流れの速度を音速以下に落とし，噴射口でまた音速以上にする技術が確立したのである．

それどころか最近では，ターボジェット・エンジンを，音速よりはるかに遅いマッハ0.8程度の速度で最大の効率を発揮するように改良したターボファン・エンジンですら，超音速で使えるようになっている．こうなると，高速でしか作動しないラムジェットの用途は，かなり限定されてしまう．

さて，スクラムジェット・エンジン（図6-1c）は，このラムジェット・エンジンを改良したものだ．改良の眼目はただ一つ．燃料を燃焼する部分の気流速度を，音速以下から音速以上にすることだ．超音速で流れる気流の中で燃焼を行う——「スクラム」という名前はここから来ている．

だいたいマッハ5～6を超える気流を，ラム圧で圧縮して亜音速まで速度を落とすと，圧縮された空気の温度が上がりすぎてしまう．そうなると，吹き込んだ燃料が燃えずに，あまりの高温のために熱分解してしまうのだ．燃料の熱分解は，熱エネルギーを吸収する吸熱反応なので，エンジンが推力を発生するどころか，逆に大きな抵抗になってしまうのである．気流の速度を亜音速まで落とさずに超音速に留めて燃焼を行えば，ラムジェット・エンジンの限界を超えて，マッハ17もの速度でも使えるエンジンとなることが期待できる．ちなみに，地球を巡る軌道に到達するのに必要な速度は7900 m/s．マッハ数に換算すると約マッハ23だ．

スクラムジェット・エンジンをツィオルコフスキーの公式に当て

はめると，見かけの噴射速度をうんと大きくとることができる．ツィオルコフスキーの公式は，噴射するプロペラントをすべて機体の内部にもっていく場合の式だ．スクラムジェット・エンジンは，機体の外にある空気を吸い込んで噴射するので，計算式上の見かけの噴射ガスの質量がぐっと大きくなる．だから，ツィオルコフスキーの公式の噴射速度に換算すると，2万m/sというような数値を実現できるのである．これだけでも，確かに夢の技術といえるだろう．

6・3　スクラムジェット・エンジン実現への道は遠い

しかしながら，うまい話にはたいてい裏があるもので，夢がそう簡単に実現できるわけではない．

先に書いたように，物体や気流の速度が音速を超えると，物理現象の現れ方は一変する．そんな環境で燃焼を維持するのは非常に難しい．気流があまりに速いので，燃焼の化学反応が進む前に気流に押し流されてしまう，ということが起こるのだ．また，超音速で流れる高温空気の流れの中では，燃焼以外の化学反応もいろいろと発生して，エンジンとしての動作を阻害する．

高温の空気からエンジン各部をどうやって保護するかという問題もある．地上での試験なら，どんどんエンジンの周囲に冷却水を流すこともできるが，実際に飛行する機体では，燃料になる液体水素を循環させるしかない．安全な冷却配管はどんなものか，実際の飛行ではどの程度の加熱がどれぐらいの時間続くのか，などを計算できる手法を確立しないと，実機用のエンジンは設計できない．

さらに追い打ちをかけるのが，試験方法の不足である．現在，この手の超高速で使うエンジンを試験する風洞は，圧縮してタンクに貯めた空気を，バーナーであぶって加熱した金属小球の詰まったカラムを通して吹き出させ，高温・高マッハ数の空気の流れをつくり出している．ところが，この方法だとマッハ8の気流までしかつく

れないのだ．より高速の空気の流れを，衝撃波を使ってつくる方法はあるものの，実験の時間が数ミリ秒しかとれない．スクラムジェット・エンジンはマッハ17まで使えるというけれども，まだ実際に使えるかどうかは確認されていないのである．

歴史的にみると，1986年にアメリカのレーガン大統領が一般教書の中で，東京−ニューヨーク間を2時間で飛行する超高速旅客機「オリエント・エクスプレス」の開発を提唱し，NASAとアメリカ国防総省がそのための実験機計画「NASP」を立ち上げてから，スクラムジェット・エンジンの研究は一気に進展した．1994年に，NASAのラングレー研究センターにある試験風洞で，マッハ6.8の飛行を模擬した試験が行われ，初めてきちんと推力が発生することが確認された．続いて，衝撃波を利用したほんの数ミリ秒の試験だが，マッハ14までの動作を確認．ところが「NASP」自体は，予算削減のために1995年に中止されてしまう．

その後，「NASP」で得られた技術を元に，2001年6月には，実際の機体に搭載した状態での性能を確認するための小型実験機「X-43」をロケットの先端に取り付けて打ち上げたが，ロケット側のトラブルで実験は失敗に終わった．

「どうやら推力は発生できるようだが，機体システムとしてはまだ実験レベルでも成功した例がない」というのがスクラムジェット・エンジンの現状である．

原理と構造は簡単だが，スクラムジェット・エンジンの実現は非常に困難なのだ．1950年代以降50年におよぶ研究の歴史を積み重ねて，未だ実用化に達していないということからしても，その困難さが並たいていのものではないことが理解できるだろう．

6・4　軌道進出でスクラムジェット・エンジンが担う エネルギーは半分だけ

それでは，ごく簡単な計算でスクラムジェット・エンジンのコスト・パフォーマンスを調べてみよう．指標に使うのは，軌道上にペイロードを届けるのに必要なエネルギーのうち，どれだけをスクラムジェット・エンジンが担うかだ．

スクラムジェット・エンジンは，マッハ 5〜6 以下では使えない．甘く考えて，マッハ 5 以上では使えると考えよう．使える上限はマッハ 17．そして，目標の速度はマッハ 23，軌道に到達するのに必要な速度である．ロケット・エンジンによる単段式完全再利用型宇宙機の計算をしたときは，損失があるので軌道に出るのに必要な速度を 10 km/s としたが，ここでは，損失を考えないお手軽な検討として，必要な速度をマッハ 23＝7.9 km/s とする．その分スクラムジェット・エンジンに対して甘く見積もることになる．

エネルギーは速度の 2 乗に比例することを利用すると，軌道に到達するための全エネルギーのうち，スクラムジェット・エンジンの発生するエネルギーの比率は式(6.1)となる*．

$$\frac{17^2 - 5^2}{23^2} = 0.499\cdots \fallingdotseq 50\% \qquad (6.1)$$

つまり 50 %のエネルギーをスクラムジェット・エンジンが発生することになる．逆にいえば，残る 50 %のエネルギーを別のエンジンが発生しなくてはならない．とくに，マッハ 17 から 23 までの間は高度が高くなるので空気は使えない．この部分は，いやでもロケット・エンジンで加速しなければならない．ロケット・エンジン

* 運動する物体のエネルギーは $\frac{1}{2}mv^2$ で与えられるが，速度の差だけに着目し，各速度におけるエネルギーの比のみを考えると，$\frac{1}{2}$と m は結果と関係なくなる．さらに，速度も音速の何倍という形，つまりマッハ数で表すと，式(6.1) と式 (6.2) のように，計算は簡単になる．

が発生しなければならないエネルギーは，式(6.2)から，45％にもなる．

$$\frac{23^2 - 17^2}{23^2} = 0.453\cdots \fallingdotseq 45\% \qquad (6.2)$$

スペースプレーンが実現したとしても，全エネルギーの4割以上は，従来と同じくロケット・エンジンで稼がなくてはならないのだ．この場合，離陸もロケット・エンジンで行うとすると，ロケット・エンジンの稼ぐ比率は50％になる．予定通りの性能を発揮したとしても，スペースプレーンは，スクラムジェット・エンジンとロケット・エンジンの2個を内部に抱えた，事実上の二段式にならざるを得ないのである．

この計算は，本当は，飛行中にどんどん減っていくプロペラントを含めた機体の総質量に対して行わなければならない．それは機体の空力特性や飛行プロファイルも関係している複雑な計算で，プロの行うべき領域に入る．

けれども，上記のようなこんな簡単な計算でも傾向はつかめる．実際問題として，ロケット・エンジンのかなりのサポートがないと，スクラムジェット・エンジンだけで軌道に到達する速度を稼ぎ出すことは難しいのだ．

しかも，ここでは考慮していない，スクラムジェット・エンジンに不利な要素がある．空気抵抗だ．ロケットは一気に上昇して，なるべく早く空気抵抗のかからない高度へと抜ける．一方，スクラムジェット・エンジンを搭載するスペースプレーンは，そうはいかない．スクラムジェット・エンジンが空気を利用するからだ．空気は，同時に空気抵抗となって飛行を妨げる．このためスペースプレーンは，受ける空気抵抗とエンジンの効率を計算に入れて，どの高度をどの程度の速度で抜けるかという飛行プロファイルを綿密に設定しなければならない．そのための理論的解析は，今も続けられている

難題だ．

一つだけ，プロの研究者による解析を紹介しておこう．「日本航空宇宙学会誌」1998（46巻）年6月号に掲載された，土屋武司・鈴木真二（東京大学大学院工学系研究科）による「スペースプレーンの機体設計と飛行経路の同時最適化に関する数値解法」だ．BDH法という数値解析の手法を使ってシミュレーションを行い，機体と飛行経路を同時に最適化できるかどうかを探っている．対象は単段式スペースプレーンで，離陸からマッハ6まではジェット・エンジンの一種であるエアターボラム（ATR）・エンジン（次節参照），そこから上はスクラムジェット・エンジンを使い，最後にロケット・エンジンで加速して地球をまわる軌道に到達する，というモデルを採用した．

結果はかなり衝撃的である．

スクラムジェット・エンジンを積まず，ATRエンジンは水平飛行を維持できる程度の小さなものに留めた場合に機体の重量が最少になって，設計として最適化されるという結論が得られたのだ．これは，ほとんどをロケット・エンジンに頼った方がよい，ということだ．この結果はシミュレーションだから，実際の設計に当たって，故障の可能性や整備のしやすさなどを考慮すると，ATRエンジンも積まない方がよいということになりかねない．

また，この組み合わせだと，どうしてもペイロードを軌道上に運ぶことができない，ということも同時に示された．いくら再利用型の機体だとしても，肝心のペイロードを運べないのでは，わざわざ開発する意味はない．

このようなシミュレーションでは，計算の前提としてさまざまな条件を仮定する．だから，仮定のやりかた次第では結果が異なることもある．それにしても，このような解析結果が出るということは，スペースプレーンが，原理的にとてつもない困難さを抱えているこ

とを示しているといえるだろう.

6・5 スクラムジェット・エンジン以外のエアブリージング・エンジン

スクラムジェット・エンジンの開発が茨の道ならば，ほかの形式のエンジンを考えればよいのではないか——実際これまでに，エアブリージング・エンジンのために，さまざまなエンジン形式が提案されてきた.

たとえば，空気液化エンジン（LACE）．吸い込んだ空気を燃料の液体水素を使って液化し，得られた液体窒素と液体酸素の混合物と水素をロケット・エンジンに吹き込んで噴射するというものだ．1980年代にイギリスが検討したスペースプレーン「HOTOL」では，この形式のエンジンが使われる予定だった．熱交換機以外は，ロケット・エンジンの技術が使えるというのが利点である.

LACEは，空気を液化する熱交換機を開発するのが困難なことが問題となり，現在研究は中断している．日本でも，1989年に宇宙開発事業団（NASDA）と三菱重工業が熱交換機の基礎試験を実施したが，その後の進展はない．ちなみに「HOTOL」は，サッチャー

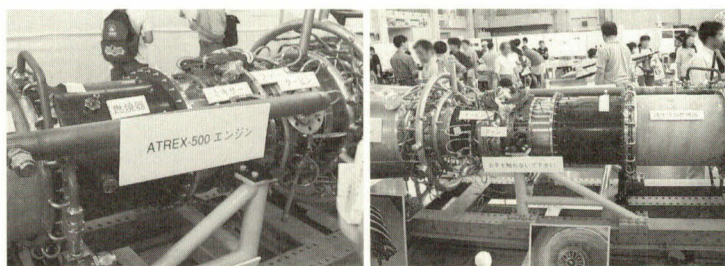



図 6-2 宇宙科学研究所と石川島播磨重工業が研究しているエアターボラム・エンジン ATREX（写真提供：林 譲治）
写真は宇宙科学研究所の一般公開の展示より.

政権が予算を大幅に削減したことで消滅した．

日本では，宇宙科学研究所と石川島播磨重工業が1988年以降，エアターボラム（ATR）形式のエンジン，ATREXを研究している．圧縮タービンをもつ一種のターボジェット・エンジンを中央に，周囲に円筒形のラムジェット・エンジンを配置したものだ（図6-2）．通常のターボジェット・エンジンの圧縮ファンは，噴射ガスで駆動するタービンに直結しているが，ATREXでは別に熱交換機でつくったガスで圧縮タービンを駆動する．こうすることで，圧縮タービンの動作条件を噴射ガスの状態と独立させて，最適な回転数を保つことができるように設計してあるのだ．高速飛行時にはファンを止めて，周囲のラムジェットで推力を発生する．このエンジンが使えるのは，ラムジェット・エンジンの限界であるマッハ6まで．このため単段式スペースプレーンには向かない．開発者たちは，二段式スペースプレーンへの適用を考えている．

さて，スペースプレーンに対する結論だ．

単段式スペースプレーンのためには，スクラムジェット・エンジンが必要だ．ただし，スクラムジェット・エンジンの実用化には，解決しなければならない技術的な困難が山積している．

さらに，そこまでしてスクラムジェット・エンジンを実用化しても，スペースプレーンというシステムに組み上げるためには，ロケット・エンジンとの併用が欠かせない．地球をまわる軌道に出ていくためのエネルギーのかなりの部分は，ロケット・エンジンに依存しなければならないのである．

第7章　多段式完全再利用型の可能性について，そして結論

7・1　NASAもスペースシャトルの後継機構想で多段式に傾く

かなりの紙幅を費やして，ロケット・エンジンを使う単段式完全再利用型宇宙機も，エアブリージング・エンジンを使うスペースプレーンも，解決すべき技術的なハードルがきわめて高いことを説明してきた．

難しいのなら，問題を難しくしている条件を外してしまえばよい．この場合，問題を一番難しくしているのは“単段式”というところだ．では，単段式完全再利用型をあきらめて，多段式完全再利用型にしたらどうだろうか．本体一体でどーんと軌道上に上がり，降りてくるというのではなく，現在のロケットのように多段式の構成で，第1段は途中で分離して地上に帰還する．そして，第2段だけが宇宙に行き，そして地上に帰還するという形式だ．帰ってきた第1段と第2段は整備の上，また結合されて打ち上げられる．

この方式だと，単段式で問題になっていたことがすべてクリアできる．ロケット・エンジンを使う場合のツィオルコフスキーの公式の限界もクリアできるし，スペースプレーン方式でも第1段をエアブリージング・エンジン，第2段をロケット・エンジンというように役割分担をすれば無理がなくなる．

現在，NASAはスペースシャトルの後継機の検討を進めている．「X-33」は挫折したが，すでに初飛行以来22年も経過したスペースシャトルは，どんなに引っ張っても2010年代のどこかで寿命がくるだろう．そのために，2005年までにさまざまな形式を検討し

て1個を選定するという方針だ.

2002年4月, NASA に提案された15の方式が公表されたが, 多段式完全再利用の方式が目立った. アメリカも現実的な方式として多段式に目を向けつつある (図7-1).

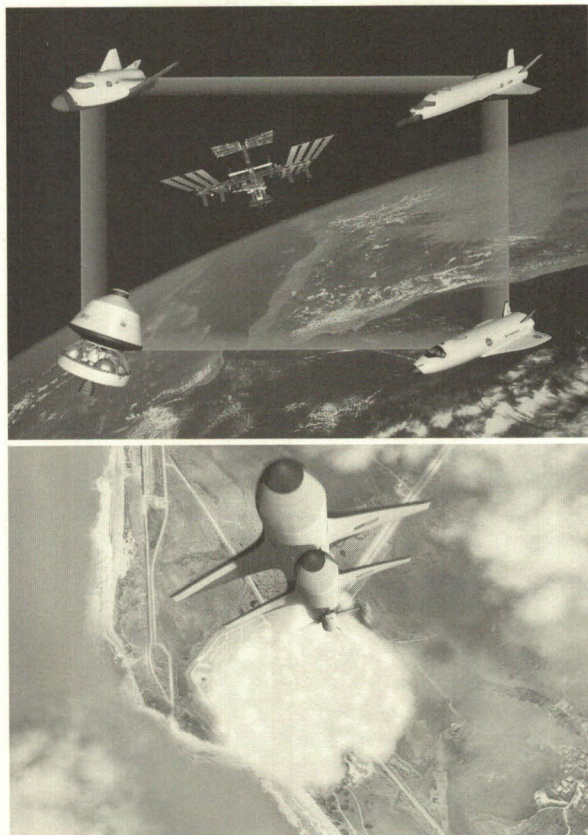



図7-1　スペースシャトルの後継機案 (画像提供：NASA)

7・2　多段式再利用型宇宙機ならではの面倒な要素も

しかし，多段式完全再利用型には，単段式のときとは別の面でやっかいな問題が出てくる．まず，第1段と第2段に分かれることによって，開発の手間がぐっと増える．第1段，第2段，そして第1段と第2段が結合した状態での空力特性を検討し，妥当な機体形状を決めなくてはならない．搭載電子機器，運用のための地上設備の検討と開発など，すべてが2倍以上になると考えてよいだろう．スペースプレーン型の場合には，まだ空気が濃い高度でマッハの速度で飛んでいる状態から，安全に第1段と第2段を分離するという難問も控えている．

開発できたとしても，運用の手間も増える．第1段と第2段をそれぞれ帰還させる場所の選択と設備の整備，緊急着陸を行う場合の場所の手配，機体の回収と発射場への輸送，機体整備と結合，プロペラント（推進剤）の注入と飛行前チェック，どれもこれも2倍以上になる．しかも，実際の運用に当たっては，打ち上げ基地，第1段向けの緊急着陸場，第2段向け緊急着陸場の3か所の天候がよくないと打ち上げができない．スペースシャトルですら，ケネディー宇宙センターの天気はよいのに，大西洋を挟んだモロッコの緊急着陸場の天候が悪くて打ち上げられないということがあった．3か所が好天でなければ打ち上げられないというのでは，かなり運用が制限されることになる．

とはいえ多段式にすると，単段式のような本質的にぎりぎりな難しさはなくなる．システム全体の構成を適切に決めさえすれば，機体の各部は現在の技術でも余裕をもって設計できるだろう．逆にいえば，第1段でどの高度でどの程度の速度まで加速するか，どのタイミングで切り離すか——こういうことが，第1段と第2段をそれぞれ適切なコストと手間で開発できるかを決めることになる．

7・3　第1段の開発規模はコンコルド以上

たとえば，第1段をラムジェット・エンジンの限界であるマッハ6まで加速する機体だとしよう．これは航空機だとすると，かなりの技術的挑戦を必要とする機体だ．過去にマッハ6以上の速度で飛んだ航空機は，1960年代にアメリカが運用した実験機「X-15」だけである．プロペラントを満載した第2段を搭載してマッハ6で飛ぶ機体となると，そのサイズは少なくとも4発の大型旅客機ぐらいになるだろう．マッハ6で飛ぶボーイングB747「ジャンボジェット」級の大きさの航空機となると，誰もつくったことのない未踏の技術領域にある機体だ．英仏共同開発の超音速旅客機「コンコルド」どころではない技術的な挑戦になる．

ところが，目標が軌道上への進出となると，かくも高速の機体から分離された第2段は，そこからさらにマッハ23まで加速しなければならない．第2段の仕事が多すぎ，第1段の仕事が少なすぎるということになる．その割に軌道への打ち上げ用としては，第1段の開発は難しすぎ，開発コストも過大になってしまう．

このような構成は，たとえばマッハ6で飛ぶ航空機の需要が別にあり，そちらに技術の転用がきく場合にのみ考えるべきだろう．

そして，たとえ多段式にしたとしても，完全再利用型宇宙機の開発にはかなりの時間を必要とするだろう．たとえば，日本が純国産ロケットを目指して開発したH-Ⅱロケットは，検討開始から初飛行まで12年かかった．開発期間だけなら9年だ．その改良型で低コスト化を狙ったH-ⅡAは，7年かかった．多段式で完全再利用型宇宙機の開発には，どう考えても検討開始から初飛行まで15年，場合によっては20年かかることを覚悟した方がよい．しかも，そうやって開発したものが，現在のロケット以上に信頼性が高く，運用コストが安いものにできるという技術的な保証は，まだできる段階にない．

7・4 「その先」に届かぬ再利用型

しかも，ここまでわざといわなかった非常に大きな問題点が，完全再利用型宇宙輸送システムには存在する．

そこまで努力して開発しても，届くのは地表から数百 km の地球低軌道なのだ．技術的にもそこでおしまい．月にも小惑星にも届かないのである．月や小惑星に届こうとするならば，まったく異なる宇宙空間専用の輸送システムを開発する必要があるのだ．二つの異なる技術には，関連があまりない．このため，地球低軌道から先に向かうには，別の技術開発が必要になってしまうのである．

一方，「ふじ」の技術は，再利用型宇宙機が実現してもその価値を減じることはない．再利用型宇宙機に「ふじ」を積んで打ち上げ，再利用型宇宙機が行くことができない，より高い高度への有人宇宙飛行に使うということも考えられる．そのような飛行でも，緊急の際に地上に帰還することが必要になる．「ふじ」のコア・モジュールは緊急帰還用にも使えるのだ．

あるいは，軌道上の宇宙ステーションに，緊急時の脱出システムとして「ふじ」を常駐させることもできるだろう．そのような用途には，再利用型宇宙機よりも「ふじ」の方が適している．

この関係は，たとえ軌道エレベーターが実現したとしても変わらない．月への往復飛行にしても惑星間飛行にしても，緊急時の脱出システムは必要になる．「ふじ」コア・モジュールを軌道エレベーターで宇宙に運び，そこで惑星間宇宙船に組み込んで，ほかの惑星に出発する，というような使い道があるのだ．

カプセル型宇宙船は，その後の有人宇宙開発におけるもっとも基礎的なインフラストラクチャーとして，末永く使いつづけることができる．開発のための投資が無駄になることはないのである．

7・5　見果てぬ夢の技術，再利用型宇宙機

第4章からずっと技術的な解説をしてきたが，やっと結論にたどり着いた．

これまで宇宙輸送システムの未来は，スペースプレーンに代表される完全再利用型宇宙機にあると思われてきた．ところが，完全再利用型の宇宙輸送システムは，実現不可能ではないが，克服しなければならない技術的課題はあまりにもハードルが高い．解決するまでに20年以上の時間がかかりそうな情勢である．

もちろん，宇宙への輸送需要がどんどん増えていけば，使い捨て型のロケットによる輸送には限界が来ることは間違いない．実際，カザフスタンでは，ソ連時代からロケットのブースターや第1段が落下して平原に残骸（ざんがい）をさらしている．旧ソ連は，最盛期には年間100機以上のロケットを打ち上げていた．残骸の数も半端ではない．

それだけならまだしも，積年の残骸からは残ったプロペラントが漏れ出して，深刻な環境汚染を引き起こしている．ロシアのロケットは，プロペラントとして毒性のあるヒドラジンや燃焼促進用の添加剤を加えたケロシンを使っている．どちらも屋外にぶちまけてよいようなものではない．

日本も年間100機もロケットを打ち上げるようになれば，海に落ちるブースターや第1段は，環境にバカにならない影響を及ぼすだろう．日本のロケットは液体酸素と液体水素をプロペラントに使っているので，ロシアほど深刻な環境汚染を引き起こすことはないが，年間100機もの残骸が海に落下するというのはぞっとする．そのような状況になれば，再利用型の実現を真剣に考えなければならない．だから，再利用型宇宙機のための努力は継続しておく必要がある．

しかし，地道で着実な技術的なステップを踏むことなく再利用型宇宙機を一気に実現しようとすることは，長期に渡って宇宙開発をも停滞させることにもなりかねない．

すでにスペースシャトルという実例がある．第2章でも述べたが，最初の宇宙船「ヴォストーク」から「アポロ」「ソユーズ」まで，アメリカとソ連は10年間の間に各々3種類の有人宇宙船を開発した．ところが，その後の10年で開発されたのはスペースシャトルただ1機種だけだった．スペースシャトル初飛行から22年，そのあいだ，完全再利用型宇宙機を目指した取り組みが続いたが，人類はただの1機種も新しい有人宇宙船を開発できないでいる．

それは目指すべき目標が，あまりにも遠かったにもかかわらず，すぐにできそうな錯覚を起こしていたからではないだろうか．

コラム：リニアモーターを使ったカタパルト

読者の中には，「地上からリニアモーターを使ったカタパルトで加速してやれば，打ち上げのコストを安くできるのではないか」と考える人もいるだろう．

JR のリニアモーターカーは，すでに時速 500 km を達成している．これで加速をすれば，その分打ち上げるロケットに搭載するプロペラント（推進剤）を減らすことができるし，プロペラントを減らせるならば，その分機体を小さくできるので，ますます軽くて小さなロケットで大きな打ち上げ能力を得られるはずだ．

果たして本当にそうなのだろうか．

まず基本的な考え方は，カタパルトのような加速機構は「地上につくりつけられた第1段」だということだ．となると，10 km/s（5・2 節参照）という打ち上げに必要な速度のうち，どれだけをこの“第1段”が担うのか，またそれに対して建設費用が割に合うものになるのか，ということを考えなくてはならない．ロケット第1段の開発コストと運用コストの総和に対して，カタパルト建設と運用の費用全体が安くならなければならないのだ．また，カタパルトで発生できる運動エネルギーが，第1段で発生するエネルギーよりも少ないようだとコスト・パフォーマンスが悪くなる．

時速 500 km は秒速に換算すると 139 m/s，10 km/s に対して 1.4 %でしかない．エネルギーで考えれば 5000 分の 1 程度だ．このように考えると，カタパルトをつくるならば，今のリニアモーターカーどころではない速度まで加速しなければ意味はないことがわかる．

そんなに加速すると，今度は空気抵抗が問題になってくる．カタパルトをチューブにして中を真空にするにしても，チューブから出るところで空気の壁にぶつかる形になり，衝撃波が発生したり，大きな振動が打ち出したロケットにかかったりして，どうもうまくないことが起きそうである．

それでは水平にではなく，高い塔を建てて垂直に加速したらどうだろうか．確かにこの方法だと，地表付近の濃い大気による空気抵抗をさけることができる．しかし，少なくとも飛行機が飛べる程度

の高度の塔ではあまり意味がない．もっと空気が薄くなる，できれば 30 km とか 40 km，可能ならば 100 km ぐらいの高さの塔が欲しいところだ．しかも垂直の速度成分は，地球をまわる軌道に入るためには無意味である．どんなに垂直方向に加速しても，軌道に入るには水平方向への大きな加速が必要になる．

もしも高さ 100 km ぐらいの塔を複数建て，その上に水平方向に加速するための，これまた全長 1000 km 程度のリニアモーターを敷設すれば，十分に小さな加速度で楽々軌道に入ることができるだろう．ちなみに野尻抱介氏の『ふわふわの泉』（ファミ通文庫）という SF 小説には，「ふわふわ」という架空の物質を使って，このような建造物を建設する様が描かれている．

もちろん現実に「ふわふわ」は存在せず，このような巨大建造物は現在の技術ではつくることはできない．たとえつくれるとしても，その建設費がロケットの第1段を開発するのに対して十分安いかどうかはきちんと検討しなくてはならない．

第8章　宇宙ステーションと「ふじ」

8・1　長期宇宙滞在を可能にする宇宙ステーション

打ち上げのときのすさまじいばかりの大音響と炎——ロケットやスペースシャトルのような宇宙輸送システムは非常に派手だ．が，その本質は，荷物を迅速に目的の場所に運ぶということであり，日々道路を走りまわっているトラックと変わりない．トラックは産地から消費地へと荷物を運ぶ．宇宙輸送システムは，人間や衛星などを，地上から宇宙へ，場合によっては宇宙から地上へと運ぶ．

アポロ計画までの有人宇宙飛行は，トラックや自動車の運転席に座ったまま何日も旅行をするようなものだった．宇宙に長期間滞在するなら，乗り物ではなく“家”が必要になる．

宇宙の家は，宇宙ステーションと呼ばれる．宇宙ステーションというと，映画『2001年宇宙の旅』でぐるぐるとまわっていたドーナツ状の構造物を思い出す人もいるかもしれない．残念ながら，2001年はとっくに過ぎた2003年現在，あれほど巨大な宇宙ステーションを人類はもっていない．ずっと小さな国際宇宙ステーションが地球をまわる軌道上で建設されており，2003年8月現在，米ロ2人の宇宙飛行士が滞在している．

「ふじ」で有人宇宙飛行を行うからには，長期滞在するための宇宙ステーションについても，「ふじ」からどうつながるかを考慮しておくべきだ．この章では，宇宙ステーションの歴史を見ながら，過去の宇宙ステーションがもつ問題点と，「ふじ」構想における解決法を説明しよう．

また，宇宙ステーションの歴史は同時に，国際協力の歴史でもあ

る．さまざまな国籍の宇宙飛行士が同じ宇宙ステーションに滞在し，各国が一致協力して宇宙ステーションをつくるというのは，確かに国際協力の象徴としてよいイメージを感じるが，その実態はどうなのだろうか．

というわけで，この章では国際協力の実際についても扱うことにする．

8・2 「サリュート」シリーズ —世界各国の飛行士を搭乗させる—

世界初の宇宙ステーションは，旧ソ連の「サリュート」だった．1960年代に月面着陸レースでアメリカに敗北したソ連は，その後宇宙ステーションに力を注いで，継続的に運用することになる．ねばり強い継続性が，ソ連の宇宙開発の特徴といえる．

最初の「サリュート1号」は1971年4月19日に打ち上げられ，6月7日に「ソユーズ」宇宙船がドッキング．ゲオルギ・ドブロヴォルスキー，ウラジスラフ・ヴォルコフ，ビクトール・パツァエフの3宇宙飛行士が24日間の宇宙滞在を実施した．ところが，6月30日の帰還時に悲劇が起きる．「ソユーズ」の再突入カプセルの空気が抜けるという事故が発生して3人が死亡したのだ．しかし，ソ連はそれぐらいであきらめる国ではなかった．最終的に「サリュート」は「7号」まで運用されることになる．

「サリュート1号」は，最大直径4.2 m，全長13.1 mで重量18.9 t．この大きさは，最後の「サリュート7号」（図8-1），そして後継の「ミール」コア・モジュールに至るまで大きく変わることはない．基本的に同じ構造体を使っているのだから当然である．町中でよく見かける路線バスぐらいの大きさで，重さは20 t積みダンプカーに載る程度．内部にはさまざまな機器が詰まっているので，居住スペースはワンルームマンションぐらいしかない．もっとも，無重力空間では天井までの空間を有効利用できるので，地上で考えるより

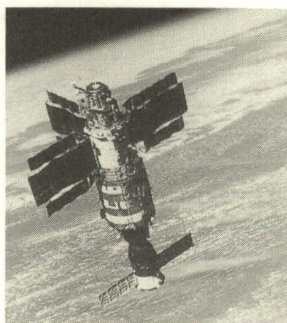



図 8-1 ソ連の宇宙ステーション
「サリュート 7 号」
(写真提供：NASA)

は空間を有効利用できる．

おおざっぱなところだが，路線バスの中で大の男 3 人が 3 週間，一歩も外に出ることなく過ごすことを想像してみよう．それが最初の宇宙ステーションの住み心地だ．狭く思えるが，「アポロ」や「ソユーズ」といった宇宙船で生活することを考えれば，はるかに過ごしやすいであろうことは容易に想像できる．宇宙食も「サリュート」シリーズの運用を通じて，進歩した．基本は缶詰だが種類が増えて，「サリュート 7 号」で使われたメニューをみると，「ボルシチ」や「キャビア」などという文字も見える．

宇宙飛行士は，「サリュート」へ「ソユーズ」宇宙船で向かう．「サリュート」に滞在している間，「ソユーズ」は「サリュート」とドッキングしたままで，事故が起きたときに地上に帰還するための緊急避難船ともなる．

続く「サリュート 2 号」は，約 1 年後の 1973 年 4 月 3 日に打ち上げられたが，打ち上げ直後に機体が破損したらしく，結局利用されないままに大気圏に再突入して消滅した．じつは「サリュート 2 号」「3 号」「5 号」は，別名「アルマース」という軍事用の宇宙ステーションだった．まったくの別プロジェクトとして計画が進んでいたものを，途中で一つの計画にまとめたのである．平和利用の

「サリュート」は第一特別設計局（OKB1）が開発し，「アルマース」系列の「サリュート」は第五二特別設計局（OKB52）が開発——と担当部署も異なっていた．「アルマース」系「サリュート」は，内部に巨大なカメラを装着しており，地表の偵察実験に使われたらしい．防御用という名目の機関銃までもっており，軌道上での発砲試験も行った．ソ連は「サリュート5号」を最後に，軍事宇宙ステーションに対する興味を失い，その後は平和利用のみを推進することになる．

「1号」「4号」と続いた民生用「サリュート」シリーズは，1977年9月29日に打ち上げた「サリュート6号」で長足の進歩を遂げた．それまでの「サリュート」は，軌道上での姿勢制御や軌道変更に使うプロペラントを補給することができなかった．プロペラントが無くなることが，即宇宙ステーションとしての寿命だったのである．一方，「サリュート6号」は，「ソユーズ」宇宙船を元に開発された無人の補給船「プログレス」からプロペラントの補給を受けることができるように設計されていた．機体の各所が劣化して使えなくなるまで，存分に利用することができるようになったのだ．また，それまでの「サリュート」では1か所だったドッキングポートが，「サリュート6号」では2か所に増えた．ただし，基本的な胴体の大きさは変わっていないので，居住スペースは相変わらずワンルームマンションのままである．

安定して継続的に使用できるようになった「サリュート6号」以降，ソ連は諸外国の宇宙飛行士を積極的に「サリュート」に送り込むようになる．招待される各国にとっては，ソ連の宇宙技術を間近に観察するチャンスだったし，ソ連にしてみれば国家の威信を国際的に示すという，政治的なデモンストレーションだった．1978年3月にチェコスロバキアのウラジミール・レメク宇宙飛行士が，外国人として初めて「サリュート6号」に足を踏み入れたのを最初に，

同年6月にはポーランド，同年8月には東ドイツ，1979年4月にはブルガリア，1980年5月にはハンガリー，同年7月にはベトナム，同年9月にはキューバ，1981年3月にはモンゴル，同年5月にはルーマニアと，ソ連は東側諸国の宇宙飛行士を次々に「サリュート6号」へと送り込んだ．「サリュート6号」は1981年まで使われ，その間に人類の宇宙滞在記録を185日まで伸ばした．

1982年4月19日に打ち上げられた「サリュート7号」では，宇宙滞在記録は237日に伸びた．1982年8月には，世界で2番目の女性宇宙飛行士としてザビーネ・ザビツカヤ宇宙飛行士が「サリュート7号」に搭乗している．ザビツカヤ宇宙飛行士は2度「サリュート7号」に搭乗した．2回目には宇宙服を着用して，女性としては世界初の船外活動を行っている．

「サリュート7号」では，西側諸国の宇宙飛行士の受け入れも始まった．先鞭をつけたのは，アメリカと一定の距離を置く科学技術政策をとるフランスである．1982年6月に，フランスのジャン=ルー・クレティアン宇宙飛行士が西側の人間として初めてソ連の宇宙ステーションに乗り込んだ．1984年4月には，インドのR・シャルマ宇宙飛行士が同じく「サリュート7号」への搭乗を果たす．この流れは，次の「ミール」でも続き，現在の国際宇宙ステーションを使った宇宙観光事業にまでつながることになる．

8・3　アポロ計画の余り物でつくられた「スカイラブ」

ソ連の着実な宇宙ステーション運用に対してアメリカはといえば，より壮大な計画をもっていた．ソ連は「サリュート」のみを開発し，地上との往復には「ソユーズ」を使ったのに対し，アメリカの「アポロ」以降の宇宙計画では，スペースシャトル，スペースシャトルからペイロードを受け取ってより高い軌道に運ぶスペースタグ，そして宇宙ステーションという，3個の新規開発システムを中心に展

開するつもりだったのである．新しいシステムをまとめて3個同時に開発というあたりに，アポロ計画のころの高揚した気分が感じられる．

しかし，月面着陸に成功した後，アメリカ国民の宇宙に対する熱狂は速やかにさめていった．NASAの予算は，すでに1966年をピークに減少に転じており，三つをまとめて開発する余裕はなかった．議会で新規開発が認められたのはスペースシャトルだけ．スペースタグは中止．宇宙ステーションは，アポロ計画の余剰物資を使う計画のみとなった．これがアメリカ初の宇宙ステーション「スカイラブ」だ（図8-2）．

とはいえ，「スカイラブ」は巨大だった．本体は，「アポロ」宇宙船を月に送り込んだ「サターンV」ロケットの第3段を改造したもので，最大直径6.7 m，往復用の「アポロ」宇宙船がドッキングすると，全長は35 mにもなった．居住スペースの容積は354 m^3

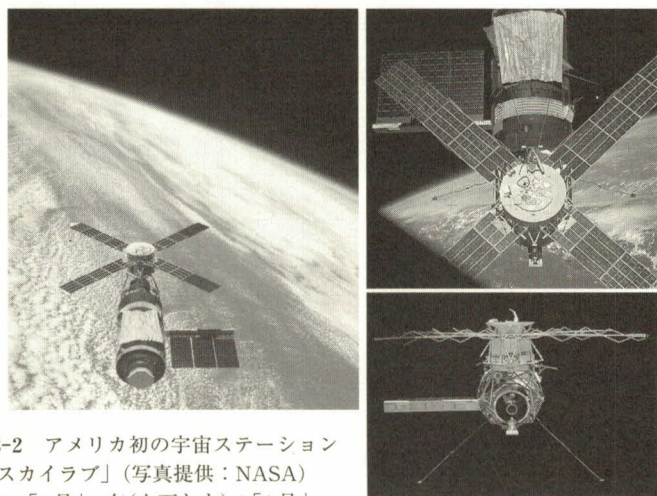



図8-2　アメリカ初の宇宙ステーション「スカイラブ」（写真提供：NASA）
左：「1号」，右（上下とも）：「4号」．

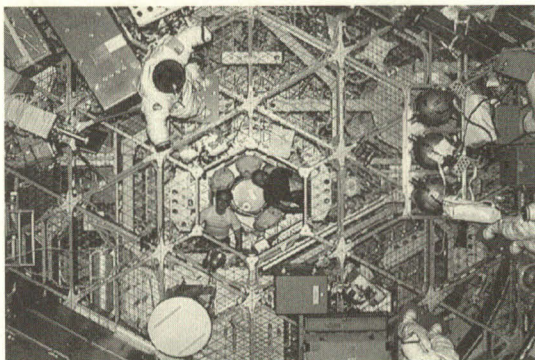



図 8-3　「スカイラブ」居住モジュールの内部（写真提供：NASA）

あり，ほぼ百畳敷きの大広間の容積に等しい（図 8-3）．人間が操作する機器は，頭を円筒形の居住スペースの“縦”方向に揃(そろ)えて装着されていた．中にいる宇宙飛行士は，巨大な縦坑の中に浮かんでいる感覚で生活したのだ．どうせ無重力だから頭がどちらを向いていても構わないだろう，ということだったのだが，この配置は「落ち着かない」と宇宙飛行士には評判が悪かった．打ち上げ能力に余裕があったので，物資の補給手段は考慮されず，すべての物資をまとめて搭載して打ち上げるという方式が採用された．

「スカイラブ」本体は，アポロ計画が終わった翌年，1973 年 5 月 14 日に打ち上げられた．ところが，打ち上げ時に，機体の外側に着けていた 2 個の太陽電池パドルのうち 1 個が，空気抵抗でもげてしまうという事故が発生する．電力が足りなくなり内部の冷却が不可能になった「スカイラブ」は，過熱による機能停止に陥りかけた．

同年 5 月 25 日に「アポロ」宇宙船で「スカイラブ」に向かった最初の乗組員は，船外活動で太陽光を遮(さえぎ)るシートを拡げて温度を下げ，「スカイラブ」の使用を可能にした．その後，3 度に渡り乗組員が滞在し，とくに 3 番目の乗組員たちは，84 日という当時の宇

宙滞在期間の記録を樹立した．

「スカイラブ」の価値は，何よりも搭載された数々の実験装置や観測機器にあった．太陽コロナの観測，単結晶ゲルマニウムの製造，魚の卵のふ化など，さまざまな実験が「スカイラブ」では行われた．実験の一般公募も行われ，当選した実験「クモは無重力空間で巣をつくれるか」では，クモが数日の適応で見事な巣を張ることが判明した．

生活面では，「スカイラブ」で初めて，無重力空間用のシャワーも使われた．といっても，無重力なので水は上から下には落ちない．直径 90 cm のビニールの円筒に入り，浴びた水は風を送って足の方に集め，回収する仕組みだった．準備と後始末に時間がかかり，あまり実用的ではなかったという．後に，ソ連も「ミール」にシャワーを搭載したが，同じ問題のためにあまり使われなかった．

多大な成果を上げた「スカイラブ」だが，アメリカは 1974 年 2 月 8 日に「スカイラブ」から帰還した 3 組目の乗組員をもって，運用を終了してしまう．「スカイラブ」に宇宙飛行士が滞在した日数は全部で 171 日間．重量 90 t の“宇宙百畳敷”巨大ステーションは，半年にも満たない利用日数をもって役割を終えてしまったのだ．「スカイラブ」と地上との往復に使える「アポロ」宇宙船は，「20 号」までを予定していたアポロ計画が「17 号」まででうち切られた結果，余った資材でつくられた 3 機だけ．もっと続けたくとも，往復に使える宇宙船は存在しなかった．

もっともアメリカとしても，せっかく打ち上げた「スカイラブ」の利用を終えるつもりはなかった．1978 年にはスペースシャトルが就航する予定だったので，スペースシャトルを「スカイラブ」にドッキングさせて，再度復活させるつもりだったのだ．「スカイラブ」は，ごくわずかながら存在する空気抵抗によって少しずつ高度を下げつつあったが，予定通りならスペースシャトルによって，再

度高度を押し上げることができるはずだった．

が，「スカイラブ」を二つの不運が襲った．一つは，スペースシャトル開発の大幅な遅れだ．もう一つは，1978〜79年にかけての太陽活動極大期に，予想以上に太陽の活動が活発化して，地球の大気圏を暖めたことだった．暖まった大気圏はちょっと膨らみ，地球をまわる軌道にある「スカイラブ」の受ける空気抵抗が大きくなったのである．大きな空気抵抗を受けて，「スカイラブ」の高度は事前の予想より早く低下した．もはやスペースシャトルは間に合わず，NASAにできることは「スカイラブ」を可能な限り安全に落下させることだけだった．1979年7月19日，「スカイラブ」は大気圏に突入して消滅した．いくつかの部品は燃え尽きずに地上に落下した．

8・4 「スペースラブ」―スペースシャトルに搭載する有人宇宙実験室―

「スカイラブ」以降，スペースシャトルの完成がNASAの一大目標となる．ところが開発予算は度々予定を超過し，その都度NASAはスペースシャトルの輝ける将来性を議会に向かって説明しなくてはならなかった．

曰く「スペースシャトルは，従来のロケットに取って代わる低コストの宇宙輸送システムで，人間も衛星も安く宇宙に運ぶことができる」

曰く「打ち上げと帰還時の加速度は小さく，一般人でも乗ることができる」

曰く「スペースシャトルは，国防総省が考える軍事ミッションに使うこともできる」

――そういった説明の中に「スペースシャトルは宇宙で実験を行うことができる」というのも入っていた．1973年からアメリカと欧

州と共同で，スペースシャトルのペイロードベイに搭載する実験室「スペースラブ」を開発していたのである．

「スペースラブ」は，スペースシャトルのペイロードベイでさまざまな宇宙実験を行うためのシステムだ．真空の宇宙空間にさらす実験装置を装着するパレット，パレットに搭載する機器を制御し電力を供給するための機器を収めたイグルー（形がイヌイットの住居を思わせるので，こう命名された），中に実験装置を格納する与圧モジュール，与圧モジュールとスペースシャトル本体のエアロックを結ぶトンネルから構成される．与圧モジュールは直径4 m，全長7 mで，内部の実験機器は打ち上げ毎に組み替えることができるようになっている（図8-4）．

「スペースラブ」は日本も利用した．宇宙開発事業団（NASDA）の毛利 衛宇宙飛行士の最初のスペースシャトル搭乗（1992年）は，

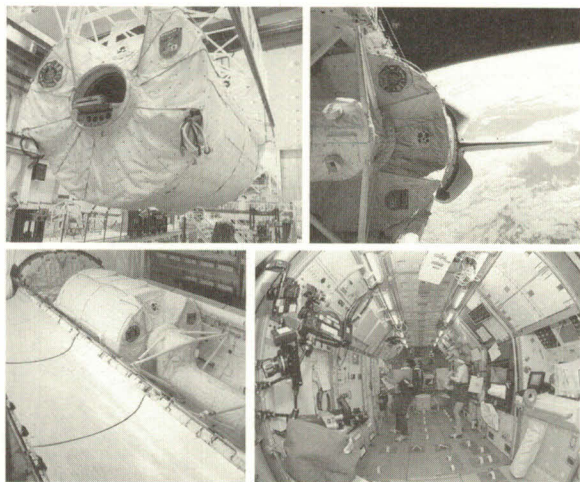



図8-4　スペースシャトル「エンデバー」に搭載された「スペースラブ」（写真提供：NASA/NASDA）

「スペースラブ」の実験装置のスペースをNASDAが借りて各種の実験を行ったというものだったし，向井千秋宇宙飛行士の2回の飛行（1994年と1998年）も，「スペースラブ」を使った宇宙実験のためのものだった．

アメリカには，「スペースラブ」に代わる宇宙実験の手段がなかったので，「スペースラブ」は1990年代後半まで使われつづけた．1982年の最初の飛行から1997年の最後の飛行まで，合計24回も「スペースラブ」は宇宙を飛んだ．うち20回が1990年代に入ってからの飛行だ．1992年には，NASAは，それまで10日程度だった飛行期間を，最大20日近くにまで延ばせるようにスペースシャトルを改造した．後述する国際宇宙ステーションが遅れていたために，スペースシャトルと「スペースラブ」を組み合わせて宇宙ステーション的に使い，可能な限りの実験を行おうとしたのである．

1997年11月の飛行を最後に，「スペースラブ」の運用は終了した．このとき，アメリカは宇宙実験を国際宇宙ステーションで実施できる見通しが立っていた．NASAは存分に「スペースラブ」を利用したといえるだろう．

ところが，NASAと共同で「スペースラブ」を開発した欧州は，実質2回しか「スペースラブ」を利用できなかった．欧州が「スペースラブ」計画に参加した理由は，十分な技術力と実績をもつアメリカと協力することで，有人宇宙活動に必要な技術を学ぶためだった．しかし，完成した「スペースラブ」は，肝心の宇宙輸送システムであるスペースシャトルがアメリカのものだったために，欧州の意向のみで運用することができなかった．結局欧州は，十分に「スペースラブ」を活かすことができず，所有権をアメリカに譲ることになってしまう．

なお，「スペースラブ」の開発開始から遅れること10年，1984年にアメリカの提唱する宇宙ステーション構想に，「アメリカと協

力することで有人宇宙技術を学ぶ」ことを目的に参加することにした国があった．日本である．

8・5 設計寿命を越えて使われつづけた宇宙ステーション「ミール」

1986年1月28日，スペースシャトル「チャレンジャー」の爆発事故が起きた．直後の2月20日，ソ連は新しい宇宙ステーション「ミール」を打ち上げる．このとき「サリュート7号」はまだまだ使える状態だった．明らかにソ連は，アメリカに対する優位性を誇示するために新しい宇宙ステーションを急遽打ち上げたのだった．

「サリュート1号」から「サリュート5号」までを第一世代，ドッキングポートが増えてプロペラント補給が可能になった「サリュート6／7号」を第二世代とすると，1986年から運用を開始した「ミール」はソ連第三世代の宇宙ステーションだった．

「ミール」最大の特徴は，ドッキングポートの数が6個と飛躍的に増えたことだ．うち4個は，「ミール」の軸方向のドッキングポートに対して90度間隔の放射状に配置されている．さまざまな機能をもつモジュールを，それぞれのドッキングポートに接続することで，「ミール」は多機能かつ大型化することができる．「ミール」は“増築”可能だったのだ．

1986年2月20日に打ち上げられた「ミール」には，次々に増設モジュールがドッキングした．1987年3月31日には，最初の増設モジュール「クバント」が打ち上げられた．「クバント」は，X線天体観測設備を中心にした宇宙天文台モジュールで，同年2月24日に発見された超新星SN1987Aの観測に活躍した．

1989年11月26日には，第二のモジュール「クバント2」が打ち上げられた．「クバント2」には，宇宙空間に出るためのエアロックや，「ミール」内の空気から水分を回収して電気分解して酸素を

発生する装置などが搭載されていた．続いて 1990 年 5 月 31 日には，第三のモジュール「クリスタル」が打ち上げられた．「クリスタル」には，半導体の結晶成長実験装置や生物学実験装置が搭載されていた．

この間，「ミール」では外国人の受け入れがどんどん進んでいた．1987 年 7 月にシリア，1988 年 6 月にブルガリア，同年 8 月にアフガニスタンの宇宙飛行士が，同年 11 月にはフランスのクレティアン宇宙飛行士が 2 度目の飛行で「ミール」に滞在した．ソ連はさらに，お金を取って民間人を「ミール」に搭乗させるビジネスも開始した．その第一号は日本人だった．1990 年 12 月，TBS の秋山豊寛記者が「ミール」に搭乗し，日本人初の宇宙飛行士となった．1991 年 5 月には公募によって選ばれたイギリスの民間人ヘレン・シャーマンが「ミール」に赴（おもむ）いた．

1991 年 12 月，ソ連が崩壊し，「ミール」を巡る情勢は一変した．有人宇宙活動はロシアが継続することになったが，打ち上げ基地のあるバイコヌールはカザフスタン領内で，ロシアがカザフスタンに賃貸料を支払って使用することになった．ロケットは，工場の所在地によってロシアとウクライナに引き取られた．「ミール」への往復に使う「ソユーズ」宇宙船はロシアが製造するが，部品の一部はウクライナがつくり，ロシアが購入することになった．

ソ連崩壊後，ロシアは極度の財政不安に見舞われた．宇宙開発予算は見る影もなく削減され，残る 2 基の拡張モジュールの開発は停滞した．そこで浮かび上がったのが，アメリカとの協力だった．

国際宇宙ステーションの慢性的な予算超過と，アメリカ議会や大統領府による予算削減に悩まされていた NASA は，ロシアを参加させることで，計画縮小を防ぐことと技術開発の負担を軽減することを狙ったのである．これは，ロシアにとってもアメリカからの資金を得るチャンスだった．1994 年 6 月，国際宇宙ステーション計

画へのロシアの参加が正式に決まった（8・6節参照）．同時に，「ミール」に新しい役割が与えられた．国際宇宙ステーションの運用に向けて，長期滞在のノウハウを得るためのアメリカ人宇宙飛行士を滞在させるのである．

地球を光学的に観測するための機器を搭載した拡張モジュール「スペクトル」と，地球環境を総合的に観測するためのモジュール「プリローダ」は，アメリカの資金援助で製造することができた．内部には，アメリカや欧州の観測装置が取り付けられ，「スペクトル」にはアメリカ人宇宙飛行士用のプライベート・スペースがつくられた．また，スペースシャトルとのドッキングを行うためのアダプターも製造された．

1995年5月20日に「スペクトル」が，1996年4月23日に「プリローダ」がそれぞれ打ち上げられ，「ミール」にドッキングした．1995年11月には，スペースシャトルによってドッキングアダプターが運ばれ，「クリスタル」モジュールの先端に取り付けられた．本体も含めて6個のモジュールに，設計時には考えもしなかったスペースシャトル用ドッキングアダプターを加えて，「ミール」は打ち上げ後約10年目にして完成したのである．完成した「ミール」は，総容積約380 m^3，重量は約112 t，完全に「スカイラブ」を越えた大きさとなった（図8-5）．

「ミール」では，ワレリー・V・ポリャコフ宇宙飛行士の437日18時間という現在の世界記録をはじめとした，長期の宇宙滞在記録が次々に生まれた．そのような長期滞在は別としても，二人一組の乗組員はだいたい半年を「ミール」で過ごすという勤務ローテーションだったことから，「ミール」は“科学観測や実験の場”や“労働の場”ということに加えて，より人間くさい“生活の場”となった．実際，宇宙飛行士たちは，さまざまなものを「ミール」にもち込んだ．公式にはもち込めないはずの酒も，アダルトビデオも

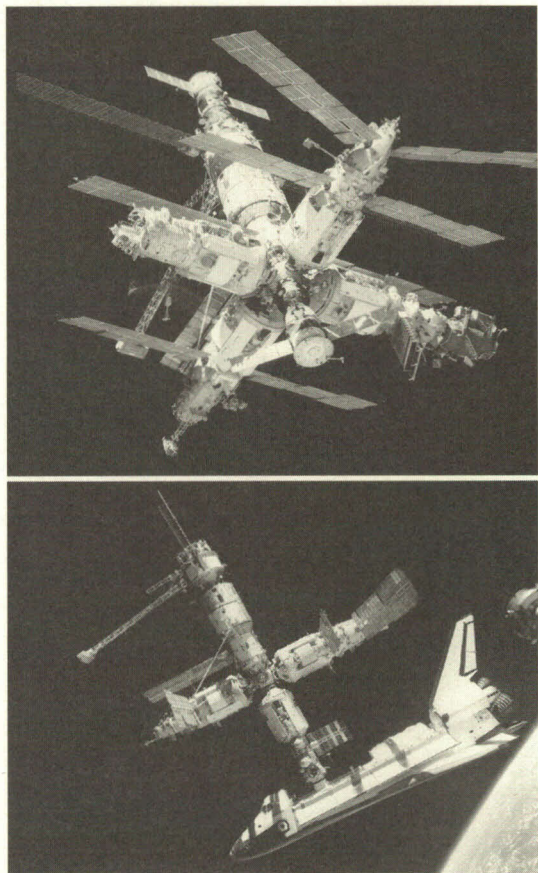



図 8-5　ソ連／ロシアの宇宙ステーション「ミール」
（写真提供：NASA）

もち込んだ．モジュールの利用法も，宇宙飛行士の生活に合わせて変わっていった．「クバント」モジュールは，いつの間にか地球からもち込んだ物資や発生したゴミの保管場所になってしまった．

人類は「ミール」で初めて，「宇宙で生活する」ことを覚えたといってもよいだろう．

そんな「ミール」も，1990年代後半，NASAの宇宙飛行士たちが長期滞在を行うようになった時期からトラブルを起こすようになった．設計寿命が過ぎてあちこちが壊れはじめたのだ．酸素発生装置やコンピューターのシステムダウンが頻発し，宇宙飛行士たちは「ミール」の修理に追われるようになった．

1997年2月23日には火災が発生した．化学的に酸素を発生させる装置を作動させたところ，火を吹いたのだ．火事は消し止められたが，「ミール」内部には黒煙が充満した．

同年6月25日には，「プログレス」貨物輸送船を使っての手動ドッキング実験の最中に，「プログレス」が「スペクトル」モジュールに衝突する事故が起きた．「スペクトル」の気密が破れて空気が漏れ出した．乗組員はハッチを閉めて「スペクトル」を隔離したが，ハッチの中を通っていた「スペクトル」の太陽電池パドルからの電力ケーブルを切断しなければならなかった．この結果，「ミール」は電力不足になり，電力を消費する実験ができなくなった．手動ドッキング実験を実施した理由は，「ソユーズ」や「プログレス」に搭載するウクライナ製ドッキング用誘導装置をロシアが入手できなくなる可能性が出てきたというものだった．「ミール」の苦境は，すなわちロシアという国の苦境にほかならなかった．

それでもロシアは「ミール」に執着した．ソ連崩壊後，見る影もなく衰退したロシアの宇宙開発にとって，「ミール」こそは栄光の象徴だったからだ．アメリカ人宇宙飛行士の搭乗計画が終了すると，アメリカは「ミール」の運用は国際宇宙ステーションに向けるべき

予算を食いつぶして建設を遅らせるとして，ロシアに「ミール」の廃棄を求めるようになった．実際，ロシアが国際宇宙ステーションに提供するモジュールの製造は，資金不足から大きく遅れた．

2001年3月23日，「ミール」は大気圏に再突入して消滅した．再突入に当たっては，プロペラントを満載した「プログレス」貨物輸送船がドッキング，その噴射で計画的な軌道離脱が行われた．

8・6　迷走を続け，今も未来が不確定な国際宇宙ステーション

国際宇宙ステーション（ISS）は，アメリカが中心になって世界16か国が共同で建設中の宇宙ステーションだ．日本は国際宇宙ステーションに実験モジュール「きぼう」を提供し，「きぼう」打ち上げをスペースシャトルで行ってもらう料金の代わりに，アメリカに生命科学実験モジュール「セントリフュージ」を提供することになっている．

NASAを中心とした世界の宇宙開発機関の間での検討は，1982年から始まっていたが，本格的に計画が動き出したのは，1984年にアメリカのレーガン大統領が年頭教書で，コロンブスのアメリカ大陸到着500周年にあたる1992年までに軌道上に国際協力で宇宙ステーションを建設する，と表明してからだった．この時期の参加国は，アメリカ，日本，欧州宇宙機関（ESA），カナダ．名称は単なる「宇宙ステーション」だった．1988年には参加国間の国際協定が締結され，ほぼ同時期にアメリカが実験と居住のモジュールを各1基，欧州と日本がそれぞれ1基の実験モジュールを提供する基本設計が固まり，名称も「フリーダム」と決まった．日本の実験モジュールは，後に公募で「きぼう」という名前が付いた．

ところが，1986年1月にスペースシャトル「チャレンジャー」が爆発事故を起こしたころから，計画は迷走を始めていた．相次いで発覚する予算の超過と設計案の不備が計画の遅延を招き，NASA

の計画管理体制の混乱がさらなる混乱を生んだ．アメリカ議会では，宇宙ステーション計画への不信感が蔓延(まんえん)して，計画打ち切り動議を巡(めぐ)る攻防が続き，そのたびに宇宙ステーションの形状や搭乗人数，発生電力などの主要諸元が変更された．

まず1989年の計画変更で，新型宇宙服や高性能の軌道変更用エンジンといった新規開発要素が切り捨てられた．1991年の計画変更では，太陽電池パドルの削減をはじめとした大幅な縮小が実施され，乗組員が8人から4人に減少した．当初予定では，8人の乗組員のうち1人が日本割り当て分となり，1年365日いつでも日本人が宇宙に滞在することになるはずだったが，日本人は1年の半分しか滞在できないことになった．1991年5月には，アメリカ下院で宇宙ステーション計画を中止するという動議が可決されてしまい，NASAが参加各国の宇宙機関代表者までを動員した多数派工作を行い，かろうじて上院で否決にもち込むという事件も起きた．

1993年2月には，民主党のクリントン大統領が宇宙ステーション予算の大幅削減を指示．計画はかつてない大混乱に陥った．宇宙ステーションの設計は根本から見直されることになり，それまでの設計は「フリーダム」という名前とともに白紙撤回された．再検討された3個の案からアルファ案が採用され，「宇宙ステーションアルファ」という名前になった．

この設計案で日本の実験モジュールは，宇宙実験のためには不利な位置に移されてしまった．宇宙実験のためには，なるべく質の高い無重力環境が必要になる．ところが，宇宙ステーションのような地球のまわりを巡る大きな構造物では，重心から離れるほど潮汐力という力がかかり，完全な無重力状態ではなくなってしまう．それまでの設計案では，すべてのモジュールをなるべく重心近くに配置することになっていたが，アルファ案では，日本の実験モジュールは欧州の実験モジュールとともに重心から大きく外れた位置に移動

されてしまった．その反面，アメリカの実験モジュールはほぼ重心位置に留まった．

のみならず，日欧のモジュールはステーションの進行方向に対して側面をさらすことになったので，微小隕石や軌道上を巡る人工のゴミ（まとめてスペースデブリという）を防ぐための設計変更を余儀なくされた．

NASA は縮小案に満足していなかった．1993 年 12 月，NASA は参加各国の了承を得た上で，ソ連崩壊後の予算確保に苦しんでいたロシアを計画に引き込んだ．「宇宙ステーションアルファ」を，ロシアが検討してきた宇宙ステーション「ミール 2」と合体させるという荒技で計画縮小を防いだのである．ステーションの規模は，最初の案に近いところまで回復し，搭乗員は 7 人になったが，ロシアが常時 3 人の滞在を要求したために，日本人の滞在枠は年間 6 か月で 1 人のまま回復することはなかった．宇宙ステーション建設や補給のためにロシアのロケットを使うことになったので，打ち上げる軌道もロシアの都合に合わせて変更された．この段階で現在の「国際宇宙ステーション（ISS)」という名称が確定した．

完成すると国際宇宙ステーションは，108.5 m × 88.4 m という巨大なものになる（図 8-6)．6 基の実験モジュールに 2 基の居住モジュール，さらに太陽電池を乗せる大型のトラスやその上を移動するロボットアームが結合しており，重量は 453.6 t．与圧部の容積は 1303 m^3 あり，国際線を飛ぶ大型旅客機 2 機分に相当する．「スカイラブ」や「ミール」の 3 倍以上だ．ここに常時 7 人が滞在して，各種の実験や観測に従事することになる．

1998 年 11 月 20 日，最初のモジュール「ザーリャ」が打ち上げられ，国際宇宙ステーションの建設が始まった．ところが，ロシアが提供する 3 番目のモジュール「ズヴェズダ」が，財政難によって製造が 1 年以上遅れてしまう．「ズヴェズダ」は，建設初期におい

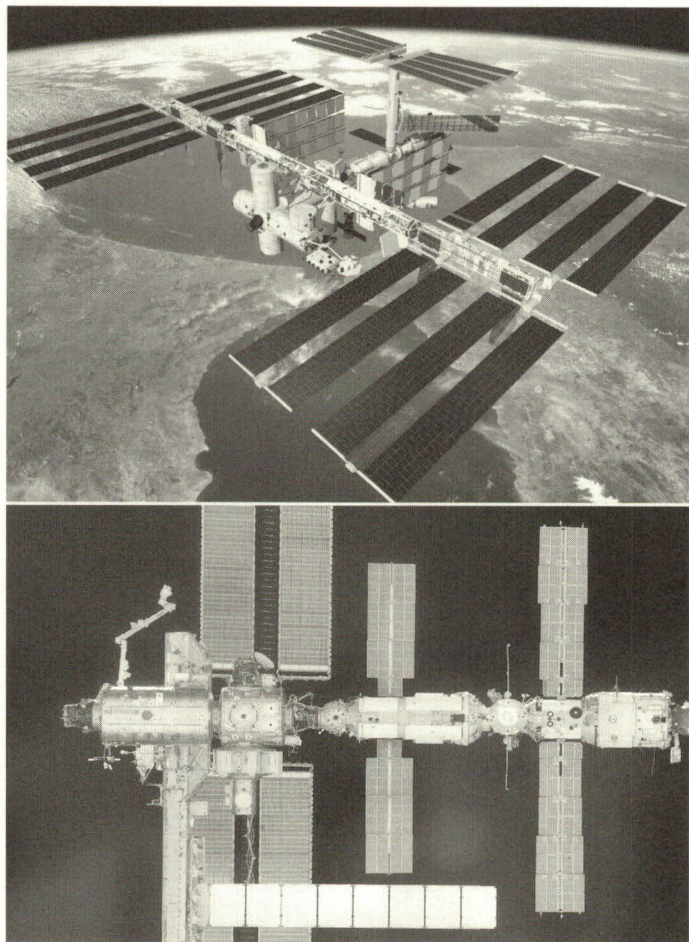



図 8-6 国際宇宙ステーション(ISS) (写真提供：NASDA/NASA)
上：完成想像図，下：2002 年 11 月 (STS-113) 現在の ISS.

て乗組員が居住するための設備を搭載しており，これが上がらないことには宇宙ステーションとしての利用が始まらない重要なモジュールだった．結局，「ズヴェズダ」は 2000 年 7 月 12 日に打ち上げられるが，その間 1 年半に渡って，国際宇宙ステーションは無人のまま空しく軌道を巡らなければならなかった．

2003 年 8 月現在，国際宇宙ステーションには，アメリカとロシアの宇宙飛行士からなる乗組員が常駐している．

完成は 2010 年の予定だ．レーガン大統領が示した 1992 年という完成時期からすれば，18 年も遅れていることになる．そして，アメリカで予算超過問題がもち上がっていた 2003 年 2 月，スペースシャトル「コロンビア」空中分解事故が起きた．事故の混乱が続いていた 2004 年 1 月，米ブッシュ大統領は新宇宙政策を発表した．宇宙開発の主力を有人月探査に振り向け，ISS は 2016 年で運用を終了するという内容だった．日本モジュールは 2008 年に打ち上げることとなったが，スペースシャトルの運航が不定期となってしまっているので予断を許さない．今後の事態の推移によっては，日本はモジュールを提供するものの，ISS に長期滞在する乗組員を送り込めないということもありうるだろう．

8・7 「ふじ」による宇宙ステーションの可能性

歴代の宇宙ステーションのたどった歴史を調べると，おぼろげに宇宙ステーションの原則というべきものが見えてくる．

まず，「人が乗っていると，たいていのトラブルは解決できる」ということだ．打ち上げ直後の「スカイラブ」や「ミール」運用後期に起きたトラブルは，どれをとっても無人の衛星だったら機能喪失につながるであろう重大なものだったが，乗組員の働きで決定的な事態を回避することができた．ロボット工学がいくら発達したとしても，人間ほどの柔軟性を期待できるのはまだまだ先のことだろ

う．状況に対応する能力だけでも，人間という“部品”を宇宙に滞在させる意味があるといえそうだ．

次に，矛盾するようだが，「人が乗ることによる限界も存在する」ということもわきまえておかなくてはならない．船内が真空になったり，生命や健康にかかわるガスが充満したり，爆発したりする可能性のある実験は，有人では行えない．地上なら十分な安全装備を調えた上で行える実験も，宇宙ステーションでは即，人命を危険に陥れることになる．地上なら火を使う実験は当たり前にできるが，有人の宇宙ステーションではそう簡単ではないだろう．

さらに，「実験用途に限るなら，あまり大きな宇宙ステーションは好ましくない」ということもいえる．国際宇宙ステーションのところでふれた潮汐力が実験の邪魔をするためだ．宇宙ステーションの内部を移動する人間が発生する振動も，実験に影響を与える可能性もある．よく「宇宙空間では対流が存在しないので，大きな結晶をつくることができる」と解説している本がある．だが，結晶成長は非常に微妙なので，潮汐力や人間による外乱を考えると，そんなに簡単に言い切ることはできない．

また，宇宙実験を行うのなら，「実験を実施するまでの手間と時間を最少にする」ことを何よりも考えなくてはならない．実験は繰り返してこそ意味がある．10年間準備して，実験は1回だけ，比較対照実験も追試もできないというのでは，実験を行う意味すら大きく減じてしまう．実験実施を待っている間の技術の進歩で，わざわざ宇宙で実験を行わなくとも，同じことが地上でできてしまうというような事態も起きてしまう．地上の技術革新の速度を過小に見積もってはいけない．

これらの条件から導き出せる，実験に向いた宇宙ステーションの理想型は，「さほど大きくなく」「なるべく頻繁に利用可能で」「なるべく頻繁に装備を更新可能で」「必要に応じて有人にも無人にも

することができる」ものということになる．

ここで，「ふじ」標準型を思い出してほしい（図1-3参照）．軌道上に1か月滞在する能力をもつ「ふじ」標準型は，そのまま小型の宇宙ステーションとして使うことができるのだ．

最初は，軌道上での1か月滞在という設計目標の確認が第一になるだろう．生命維持装置をはじめとした「ふじ」そのもののハードウェアの機能実証はもちろん必要だ．加えて，1か月の宇宙滞在を達成するためには，1か月の宇宙滞在でも乗組員の健康を維持できるような食事や運動のメニュー，狭い閉鎖された環境で精神の安定を保つための日課の策定や娯楽の開発，緊急時の行動マニュアルなど，運用のためのソフトウェアの開発も必要になる．この段階では，すべてのモジュールは1回限りの使用で使い捨てる．何年もの利用に耐えるだけの耐久性を与えることよりも，打ち上げの度にデータを取得して問題点を洗い出し，改良を加えることに重点を置くのだ．

次の段階では，拡張モジュールに電源となる太陽電池パドル，廃熱を宇宙空間に放射するためのラジエーターを装着して，本格的な実験装置を搭載することになるだろう．この段階でも，まだ再利用は考えない．新たに追加した機器の動作検証を行うことを目的とする．

第三段階で，初めて拡張モジュールに姿勢制御装置や航法電子機器を搭載して，コア・モジュールを分離した後も，拡張モジュール単体で飛行を続けられるようにする．ここまで来れば，かなり柔軟な運用が可能になるだろう．人間の存在すら邪魔になるような微妙な実験や，人間がいては行えないような危険な実験も，実験装置をセットしてから宇宙飛行士がコア・モジュールに乗り移って分離し，遠隔操作で行えばよい．

打ち上げ毎にモジュールを追加していって大型化するのもよいだろう．宇宙ステーションが大型化すると，潮汐力のために実験環境

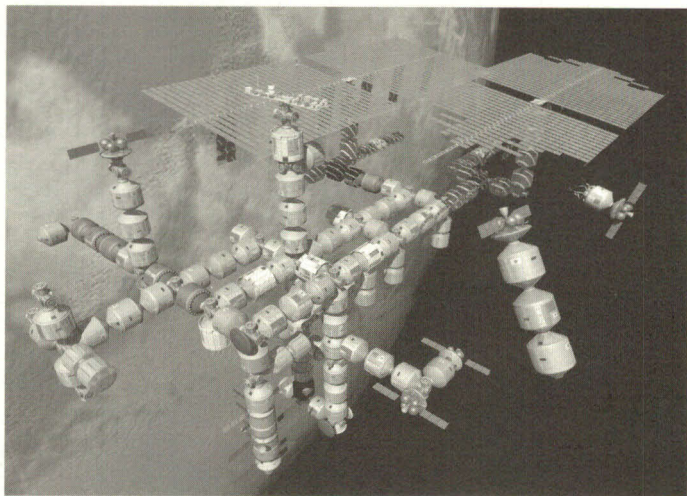



図8-7　「ふじ」モジュールを使った宇宙ステーション構想
（イラスト：小林伸光）

は悪化するが，実験を行うモジュールを実験毎に分離すれば，無人のときと同じ条件で実験できる．

その先には，第1章で示したような，どんどん増殖していく宇宙ステーションというものも考えられる．モジュール構成の利点は，耐用年数が来たり決定的な故障を起こしたモジュールを新品に交換しながら，継続的に使えるということだ．ひとたび完成したら，古くなるに任せるというのではなく，生物のように新陳代謝を行う宇宙ステーションである（図8-7）．

宇宙ステーションをどんどん増殖させていくつもりならば，「ふじ」のドッキングポートを，最初からそのような使用法に耐えるだけの強度をもたせて設計する必要があるだろう．また，複数のモジュールがドッキングした場合に，どのようにたわみ，震動するかをあらかじめ解析しておき，拡張モジュールの基本設計に織り込んでおく

ことも考えなくてはならない．逆にいえば，そのような配慮を最初からしておくならば，「ふじ」によって開発されるモジュールは，そのまま大型宇宙ステーションの構成要素として使えることになる．「ふじ」の技術でつくられる宇宙ステーションは，段階的な開発が可能で，しかも拡張性に富んでいるのだ．

8・8　国際協力の理想と実際

いくら着実にステップを踏むことが可能であっても，「ふじ」の開発に続けて，日本独自の宇宙ステーションの開発を行うべきだろうか，という疑問をもつ人も当然いるだろう．宇宙ステーションの打ち上げと運用は，ビルの建設とはわけが違う．国際協力でコスト的な負担を分散させて実施すべきだ，という意見も出てくるはずだ．

「国際協力」というのは美しい言葉だ．しかし，実際の国際協力は，「利用するか利用されるか」の過酷な駆け引きの連続である．そして，国際協力の実例をみる限り，一つの例外もなく「基幹となる技術をもつ側が，技術をもたない側を支配する」という関係が成立している．

「スペースラブ」の開発では，「スペースラブ」を運搬するスペースシャトルこそが基幹技術だった．だから，アメリカは「スペースラブ」を存分に利用することができたし，共同開発をした欧州は，十分に「スペースラブ」を利用することができないままに手放さなければならなかった．

現在進行中の国際宇宙ステーション計画でも，同じ関係がみてとれる．国際宇宙ステーション計画での基幹技術は，人間の往復に利用するスペースシャトルと「ソユーズ」宇宙船，そして宇宙に人間を滞在させる技術だ．だからこそ，ロシアはひどい財政難にもかかわらず，国際宇宙ステーションに乗組員を常時滞在させることができるし，完全に完成した時点で3人を常時滞在させることを要求で

きるわけだ.

ところが日本は，基幹技術を保持していない．だから，計画に対する決定的な発言権を確保できず，1993年の設計変更で実験モジュールは条件の悪い位置にもっていかれてしまった．しかも，前にも述べた通り，2003年8月現在，日本人が本当に乗れるかどうかわからない状態に置かれている.

日本の実験モジュール「きぼう」の開発には，総額3100億円の予算が投じられる．加えて，「きぼう」が国際宇宙ステーションにドッキングした暁には，その運営費用が年間300億円，年2回の補給打ち上げのために年間400億円，合計で年間700億円を支出しつづけなくてはならない．にもかかわらず，今なお日本人が乗れるかどうかすら決まっていない――基幹技術をもたずに国際協力に参加するということは，つまりこういうことなのである.

もしも今現在，「ふじ」を日本がもっていたならば，話は変わってくる.

国際宇宙ステーションの定員は二つの要因で決まる．一つは，居住モジュールの定員であり，もう一つは，緊急時に地球に帰還するための緊急脱出船の定員だ．現在の国際宇宙ステーションの居住部分は，ロシアの提供する「ズヴェズダ」モジュールの中にあり，定員3人．そして緊急脱出用に，定員3人の「ソユーズ」宇宙船が常時ドッキングしている．今までの計画では，完成時にはアメリカの居住モジュールと，「ソユーズ」に代わるアメリカ製緊急脱出船「CERV」が装備して，7人の常時滞在を可能にするはずだった．ところが，予算超過により「CERV」は開発中止になり，居住モジュールもキャンセルの瀬戸際に立たされてしまった．このために日本人の滞在が危ぶまれている.

もしも今「ふじ」があれば，緊急脱出船として提供できる．「ふじ」は，宇宙観光バージョンでも定員5人であり，国際宇宙ステー

ションへの7人の滞在を実現させるには，定員が足りない．が，定員3人の「ソユーズ」よりは余裕がある．だから，もしも「ふじ」があるならば，それをテコにしていろいろと交渉をする余地が生まれてくるのである．

今，存在しない「ふじ」をもって国際宇宙ステーションを語るのは空しいことだ．しかし，今後国際協力を対等の立場で進めて成果を得るためにも，有人宇宙技術の基幹となる「ふじ」の開発は有益なのである．

第9章　宇宙を巡る産業構造

9・1　日本の宇宙開発はマイナー産業

WWW サイトで宇宙開発情報をまとめていた筆者のところに，ある日，しばらく音信が途絶えていた高校時代の友人からメールが届いた．懐かしい思いでメールを読むと，そこには「WWW サイトみたぞ．宇宙なんて夢のようなバカやってないで仕事しろ仕事」と書いてあった．

世間には，このように考える人も少なからず存在する．「仕事しろ仕事」という旧友からのメールには，「宇宙は道楽であって，産業ではない」という認識が感じられる．

宇宙産業を巡(めぐ)って大きなお金が動くなら，興味をもつ人も増えるだろう．ところが，日本において宇宙開発は，産業としてはささやかなものである．衛星通信のように，民間資本が参入している分野を除くなら，国家予算がそのまま産業規模という世界だ．日本航空宇宙工業会がまとめた 2001 年度における日本の宇宙産業の売り上げは，3618 億円で 73 %が官需である．ちなみに 1999 年のアメリカの宇宙産業は 3 兆 4603 億円，欧州の宇宙産業は 5144 億円を売り上げている．

「海外の宇宙産業と比較するのは，日本人の悪しき横並び意識だ」というならば，大手企業の 2001 年度売り上げと比べてみよう．トヨタ自動車が 15 兆 1063 億円，ソニーは 7 兆 5783 億円だ．

「世界的企業と比べるのが間違っている」というならば，もうちょっと我々に身近なビール会社の売り上げと比べてみよう．キリンビールが 1 兆 5619 億円，アサヒビールが 1 兆 4333 億円．

「酒のように生活に密着したものを生産している会社と比べるのが間違っている」というならば，食べ物を離れて，放送各社の売り上げを調べてみよう．NHK（受信料収入）が6630億円，フジテレビが4369億円，日本テレビが3587億円，東京放送（TBS）が2688億円，テレビ朝日が2199億円，テレビ東京が1011億円．

日本の宇宙産業全体の大きさは，だいたい日本テレビ1社の売り上げと等しい，ということである．似たような規模の会社を探してみると，日清製粉が3972億円，ライオンズマンションで知られる大京が3425億円，繊維のクラレが3059億円．産業全体で3600億円強というのは，実際問題として日本経済全体からすると取るに足らない規模なのだ．

個々の開発項目で考えてみても，H-Ⅱロケットが2700億円，国際宇宙ステーションの日本モジュール「きぼう」が3100億円，H-ⅡAロケットが1100億円．それぞれ巨大技術開発ではあるのだが，経済活動として考えると，じつにささやかな額であることが理解できるだろう．日清製粉1年間の売り上げで，H-ⅡAロケットが3回以上開発できるのである．

9・2　開発投資を国家が負担　―宇宙産業の特殊な事情―

宇宙開発に限らず，機械全般を開発し，運用するためにかかるコストは三つに分類される．開発に必要な**開発コスト**，製造するための**製造コスト**，運用するために必要な**運用コスト**だ．自動車ならば，最初に自動車メーカーが自動車を設計して完成させるためのコストが開発コストであり，商品としての自動車を製造するためのコストが製造コスト，自動車を買ったユーザーが自動車を利用・維持するためにかけるお金が運用コスト，ということになる．自動車の場合は，メーカーが投資を回収する必要があるので，自動車の価格には開発コストと製造コストが含まれている．

宇宙分野のコスト構造は，ほかの産業と少々異なる．

まずロケットでは，開発コストは運用コストに積み上げていない．自動車と異なり，開発にかかった費用を運用で回収することは行われていないのだ．ロケットの開発が巨額の予算を必要とする事業であり，しかも開発コストを民間から回収できるほどの需要が見込めるほど市場が大きくはないからである．

開発コストを負担しているのは国家である．現在のところ，宇宙機はどれも国家予算によって開発されているといって間違いはない．世界でもっとも商業的に成功したロケットは，欧州の「アリアン」ロケットシリーズだが，開発予算は欧州宇宙機関（ESA）が支出しており，商業打ち上げを行っている民間企業アリアンスペース社は，顧客に提示する打ち上げ価格に開発コストを上乗せしていない．

アメリカでは，1991年の冷戦終結以降，官需から民需への転換が急速に進んだ．すでに，民間主導でロケットを開発するのが一般的になっている．ただし，国家はメーカーに，最初に一気に大型発注をかけることで，間接的に援助をしている．その支援は徹底しており，たとえばロケットの場合には，打ち上げるべき衛星がまだなくとも，打ち上げの機会を買い上げるという形でメーカーに資金を供給している．このやりかたは，補助金とは異なり，天下りをはじめとした官の無用の口出しを防ぐという効果もある．

日本ならば，文部科学省や経済産業省が「打ち上げる衛星がないけれども，ロケットの打ち上げ機会を買う」として予算案を立てても，財務省が「無駄な支出」と形式的に判断して却下するだろう．しかし，アメリカの場合，それは税金の無駄遣いではなく，産業支援策なのである．

人工衛星の場合は，通信衛星や放送衛星というはっきりした民間需要があるので，メーカーが自己リスクで衛星を開発・販売している．しかし，この場合も，新しい型式の衛星を開発する場合には，

国家が最初に大量発注をかけて支援するのが普通だ．たとえば，アメリカのヒューズ社（現在は買収の結果ボーイング社）が，1990年代初頭に開発した衛星バス（人工衛星の基本的な構造体）「HS601」は，最初にアメリカ海軍が軍事通信衛星「UHF Follow-on」用に大量発注して支援した．その結果，「HS601」は民間衛星市場でもベストセラーとなって成功し，「HS702」「同HP」といった後継製品をも生みだした．

こんな状況がいつまで続くかはわからない．が，ワールドワイドな市場が存在する大型旅客機市場でも，欧州のエアバス社は政策的に欧州各国から多額の補助金を得ており，事実上機体の開発コストは国家が負担している．ボーイング社を抱えるアメリカは，その政策を不公正だとしているが，欧州は，民間航空機産業は欧州にとって必要であり，たとえ補助金を投じても維持する価値があるとして，アメリカの主張を気にする風もない．確かに，大型民間旅客機を開発できるのはボーイング社だけとなると，これはこれで市場は不健全になってしまうだろう．

9・3　精神の退廃を生む閉鎖的な産業構造

10年以上昔，まだ文部科学省が文部省と科学技術庁だったころ，筆者は農林水産省から科学技術庁の予算課に出向してきたある課長と話をする機会があった．まったく無関係の農林水産省から科学技術庁，それも予算課に出向で課長がやってくるあたりが，霞が関という土地の奇妙な風土なのだが，それはさておいて——．

彼は「宇宙開発分野はつまらない」と，記者である筆者に向けて嘆いた．

「私が農林水産省にいたときに作成した予算は，日本あまねく農村に投資され，経済効果は全国に及んだものだ．ところが，科学技術庁の宇宙開発予算はどうかといえば——」

彼は右手を拡げて，5本の指を筆者の前に突き出して言った.

「まあ，これぐらいの数の企業に金がまわってオシマイなんだ. じつにつまらない」

農林水産省からの出向課長が嘆いた宇宙産業の状況は，現在でもまったく変わっていない. むしろ脱落する企業が出たことで，関係する企業の数は減っている. しかも新規参入はない.

このような状況は，日本に限ったことではない. アメリカのロケット産業は，合併と吸収を繰り返した結果，ボーイング社とロッキード・マーチン社，そして小型ロケットというニッチ市場を狙って成長したオービタル・サイエンス社の3社に集約された. 欧州では，航空宇宙産業全体がEADSという企業連合に集約された. アメリカでは，今もベンチャー企業が参入の機会を伺っているので，必ずしも日本と同じというわけではないが，参入しやすい市場ではない. 洋の東西を問わず，宇宙産業は閉鎖的なのである.

その理由は，宇宙産業の出自が軍需と重なっていると同時に，軍需と同様に官需しか存在しなかったからだ. 軍需技術は，軍事機密を理由に，関連企業が保護され，閉鎖的であることが当然とされる. 軍需産業は，国家が必要だとする機材をコスト無視で生産してきた. 宇宙産業も，この流れをそのまま受け継いでしまったのだ.

日本の場合，発注のやりかたにも問題がある. 日本の官庁が行う調達では，まず生産に必要となるコストをこと細かに算出し，一定の割合で利潤を上乗せした額がメーカーに支払われる. このため，コストダウンを進めると，メーカーの受け取る利潤が少なくなってしまうのだ. これではコストダウンを進めるどころか，コストを水増しして利潤を増やそうとする可能性すら出てくる. 実際，1998年に起きた防衛庁への水増し請求事件は，必要コストを過大に見積もることで利潤を増やそうとするものだった. その後，宇宙開発事業団（NASDA）においても同様の水増し請求事件が発覚している.

さらには，低コスト化を目指した計画を立ち上げても，白眼視されてしまうことも起こる．「ブツが安くなれば利潤が減る」のだから，メーカーとしては従来通り高コストの製品を納入していた方がよい，ということになってしまうからだ．

閉鎖的な業界は，精神的な腐敗をも生む．1997年6月，NASDAの打ち上げた地球観測衛星「みどり」が，突如機能を停止するという事故があった．ある日本メーカーが開発した太陽電池パドルに欠陥があり，衛星が地球の影に出入りする際の温度変化による伸び縮みに耐えきれずにちぎれてしまったのだ．

このとき，そのメーカーの関係者が，「しめた，この事故のおかげで，次の衛星の太陽電池パドルもうちが受注できる」と発言した，という噂が流れた．事故が起きると，事故調査を行って原因を特定し，対策を行わなくてはならない．対策を行った太陽電池パドルは，その対策に意味があったことを示すために，次の衛星に搭載しなくてはならない．だから，その企業のパドルが次の衛星にも使われるにちがいない．受注は決まったも同然だ，という論理だ．もちろん，その企業の担当者が，本当にこのように言ったとは考えにくい．何者かがその企業を貶（おとし）めるために流した噂だろう．

問題は，発言の真偽よりも，この噂が業界内で拡がったということにある．「ありそうなことだ」として，皆が相互に噂を流し合ったということは，噂に示されるような腐敗体質を宇宙産業が抱えている，ということを示している．

9・4　信頼性第一という正論が高コストの設計を蔓延させる

閉鎖性に加えて，現在の宇宙産業にはもう一つ，大きな問題がある．高コスト体質だ．

高額で，ひとたび宇宙に出ると修理が困難な宇宙機には，きわめて高い信頼性が要求される．新規参入がない市場で高信頼性を追求

すると，当然コストがかさむことになる．民生品と同じ部品が，「宇宙でも使えることを試験を行って保証してある」というだけで，価格が 100 倍以上に跳ね上がるのだ．

その結果起きたのは，奇妙な“技術の停滞”だった．信頼性の確認には膨大な試験が必要となる．試験を行っているうちに，進歩の早い半導体部品などはすっかり時代遅れになってしまう．ところが，信頼性第一なので，新しい技術の入った部品を使うよりも，たとえ単価が高くとも確認ができている古い部品を使うことが当たり前になる．技術は停滞し，いつまでたってもコストダウンは進まない．

これを逆に，部品メーカーからみると，大した数量が出ない部品のために製造や検査のラインを維持しなければならないことを意味する．収益を上げることが使命の民間企業にとって，宇宙用認定部品は「いつまでもつきあってはおれない厄介者」ということになる．

2002 年 6 月，NASDA は部品メーカーの多くが宇宙用認定部品の製造を辞退しつつあることを明らかにした．NASDA 認定の宇宙用認定部品 346 種類のうち，186 種類が認定辞退または辞退を予定している．半導体部品である IC は，122 種類のうちじつに 120 種類が認定辞退という状況だ．NASDA は，「コスト高，部品開発に投資しない，新しいニーズに応えられない」という悪循環を起こしていると分析し，部品供給体制を見直すとしている．

これとは別に，2002 年 5 月には，NASA がスペースシャトル用にアメリカのインテル社のマイクロプロセッサー「8086」を中古電子部品市場からかき集めている，ということがニュースになった．「8086」というのは，20 年以上昔の 16 ビット・プロセッサーだ．NEC の最初の 16 ビット・パソコン「PC-9801」(通称「初代 98」) に使われたものだといえば，その古さを理解してもらえるだろうか．NASA は，集めた「8086」を，スペースシャトルを支援する地上設備の試験用に使うらしいが，つまりは生産すら中止になってしまっ

た20年以上昔の技術が，今も宇宙分野では使われつづけているのである．それもこれも，“信頼性第一”を目指した結果なのだ．

信頼性第一の姿勢は，市場の閉鎖性をよりひどくすることにもなった．「新しく参入する企業は，実績がないから信頼できない」というわけだ．信頼性への要求が新規参入を阻み，新規参入がないことがコスト低下を阻害して市場の拡大を難しくし，市場が拡大しないから1機ごとの宇宙機にますます信頼性が要求される——まさに悪循環である．

硬直化した官需頼みの体質を温存していては，日本の宇宙産業に未来はない．また，信頼性を巡る悪循環を断ち切らなければ，高コスト体質を打破できない．

そこで，「ふじ」構想では，有人宇宙船開発を通じて，宇宙産業の活性化と，その先の新しい産業創出を可能にするための方法論を提案する．

キーワードは「オープンアーキテクチャー」である．

第10章　オープンアーキテクチャーで産業活性化を

10・1　パソコンの発達を支えたオープンアーキテクチャーの思想

オープンアーキテクチャーという言葉は，「システム／サブシステムを拡張するのに必要な情報が公開され，その情報が自由に使え，第三者が互換性をもつシステム／サブシステムを製造することが可能な状態」のことを意味する．

もっと簡単にいうならば，そのシステムをつくるために必要な情報がすべて開示されていて，しかも一定の規則を守れば拡張することもできる，ということだ．

「ふじ」構想では，

・システム／サブシステム間の機械／電気／熱的インターフェースなどの情報を公開する．
・上記インターフェースの第三者使用に法的／金銭的制約を設けない．
・安全性も含めた，システム／サブシステム試験基準を公開する．

ということを前提においた．

一言でいえば，誰でも「ふじ」をつくることができるようにするのである．大企業だろうが町工場だろうが，日本企業であろうが海外企業であろうが，集団だろうが個人だろうが――「ふじ」をつくると決意したものが，そのために必要な情報を容易に入手できるようにしようというのだ．

歴史的に，オープンアーキテクチャーを採用したシステムはいろいろある．なかでも効果的かつ劇的にオープンアーキテクチャーと

ともに普及したのはパソコンだった．

現在，アメリカのアップルコンピュータ社の製品を除けば，我々が利用しているパソコンのほとんどが，1981年にIBMが発表した「PC/AT」の互換機である．当時，IBMは大型機市場で独占的な地位を占めていたが，1970年代にまだ萌芽の段階だったパソコンの可能性を過小評価してしまった結果，新興のアップルコンピュータ社に出遅れてしまった．

そこで，IBMはPC/ATのハードウェアやBIOS（ハードに組み込まれた入出力に使うプログラムのこと）などの内部情報を公開し，誰がPC/ATをつくっても構わないことにした．

オープン化の反響は巨大だった．コンパックやデルをはじめとした互換機メーカーが次々と誕生して，さまざまな特徴をもつPC/AT互換機を販売したのだ．価格は大幅に低下し，市場は急速に拡大した．互換機メーカーの間では激烈な競争が発生して性能を競ったことで，パソコンの能力は一気に向上した．消費者は，常に最先端のテクノロジーが安い価格で入手できるようになった．

さらには，拡張するための規格が公開されたことにより，さまざまなメーカーが独自の機能をPC/AT互換機に与えることが可能になった．

PC/ATはまともなサウンドを発生することができなかったが，シンガポールのクリエイティブ・メディアというメーカーが高品位のサウンドをつくり出す拡張ボードを発売して，PC/AT互換機は音楽を奏でることができるようになった．また，PC/ATは，ごく初歩的なグラフィックスの規格しか策定されていなかったが，アメリカのエススリー社をはじめとした周辺機器メーカーが，より高精細で美しい画像を高速に表示できるようにするグラフィックス処理プロセッサーを開発し，拡張ボードに仕立てて販売した．これにより PC/AT互換機は，美麗なグラフィックスを表示できるようにな

った．グラフィックス関連は，それだけで一つの巨大な市場を形成し，そこでもパソコン本体と同じような激烈な競争で技術の進歩と価格の低下が同時に進行した．

周辺分野でさまざまな競争と進歩を巻き起こしながら，PC/AT 互換機は IBM が当初想定した「ビジネス向けのパソコン」という枠を大きくはみだして，あらゆる分野で普及していった．現在の PC/AT 互換機パソコンは，1981 年の最初のマシンとは似てもにつかないものに進化している．

「ふじ」構想は，このような状況を有人宇宙船の分野でもつくり出すことを目指す．オープンアーキテクチャーを採用することで最初に目指すのは，宇宙産業の閉鎖性の打破である．

10・2　民生用の部品と規格を宇宙機に取り入れ，設計を公開

「ふじ」構想では，オープンアーキテクチャーにより参入障壁を下げて，まず新しい企業の参入を促す．

オープンアーキテクチャーには，民生品の技術を積極的に採用して，大量生産されている民生部品が使えるようにする．とくにパソコンや家電向けに開発された部品や規格は，積極的に採用することになるだろう．USB や IEEE1394，PCI バスといったパソコンユーザーにはなじみ深い規格が「ふじ」に組み込まれることになる．

信頼性の確保にも，新機軸を導入することになるだろう．現在考えられるのは，電子回路の多重化による信頼性の確保と，民生部品のスクリーニングによる部品調達だ．

多重化というのは，同じ構成の回路をいくつも搭載して，同時に同じ計算をやらせて比較することで，いくつかが誤動作しても正しい答えが得られるような仕組みのことだ．これで，「試験によって絶対確実に動作することが保証されているけれども高価な部品」を使わずに，「宇宙空間では多少動作が不安定になるが，安価な民生

部品」を組織的に使えるようにする．

民生部品のスクリーニングというのは，たとえば同じ部品を10個買ってきて試験を行い，一番よいデータを出した部品を使うという手法だ．どんな部品でも，ある範囲内で性能のばらつきが存在する．「絶対に所定の性能が出ると保証されているけれども，高価な部品」を使うのではなく，「一般に販売されている部品をたくさん買ってきてテストを行い，一番よい性能を出した部品」を使うのだ．最初にたくさんの部品を買うのでは，信頼性が保証された部品を買うのと同じぐらいのコストがかかるのではないか，と思われるかもしれない．しかし，そこまでしてもまだ，民生部品を使う方が安くつくのである．大量生産されている民生部品は，おそろしいまでにコストダウンが進んでいる．スクリーニングのための標準的な試験手順も，「ふじ」構想ではオープンアーキテクチャーの一環として

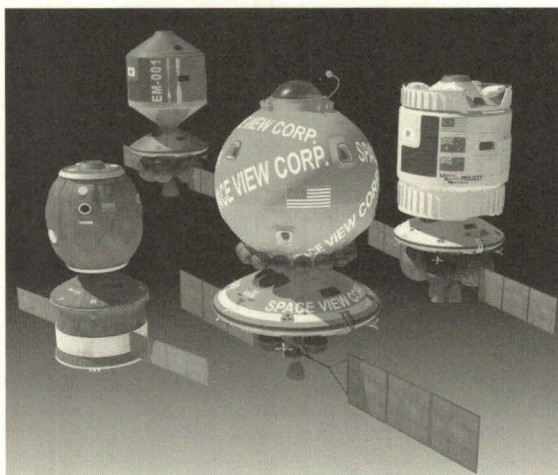



図 10-1　「ふじ」はオープンアーキテクチャーを採用する
（イラスト：小林伸光）

公開することになるだろう．

とはいえ，「ふじ」オープンアーキテクチャーにさまざまな産業を呼び込むためには，「『ふじ』宇宙船をつくると儲かる」という環境が必要になる．官需ではない民需の立ち上げだ．これがなかなか難しい．

最初の呼び水は，「高コスト体質に慣れている既存メーカーに取って代わる」ということになるだろう．その前提としては，最初のうちは，官が多少実績不足に目をつぶっても，より安いメーカーの「ふじ」互換機を購入するというような政策が必要になる．初期段階における適切な官需による需要喚起は，これまで見てきたように，欧米では普通に行われていることである．

そこまでしても，実際の新規企業の宇宙分野への参入は難しいかもしれない．しかし，たとえ実際の参入はなくとも，新規参入を保証するような官需による誘導は，既存メーカーに対して，いつでも新規参入がありうるということが緊張感を与えて，コストダウンへの圧力となるはずだ．

次の呼び水は，低コスト化による「ふじ」に対する需要の増加だ．コストダウンを進めても需要が増えなくては，企業としては利潤が見込めない，先細りの魅力に乏しい分野となってしまう．ここでは，民間の「ふじ」利用に期待したい．そのためには，「ふじ」利用を促進するための規制緩和や利用促進策が必要になるだろう．といっても，条件付き補助金によって民間を縛(しば)るようなことは避けなくてはならない．

「宇宙観光の実現」は，オープンアーキテクチャーが成功するための鍵だといえる．2001年4月に，アメリカの大富豪デニス・チトーが2000万ドルをロシアに支払って，国際宇宙ステーションに観光客として1週間滞在した．この飛行に対しては，世界中の大富豪から問い合わせが入り，2002年4月には2人目の観光客が国際

宇宙ステーションに向かった．金額さえ折り合うならば，宇宙観光を楽しみたい人は多い．宇宙観光の切符に対して，適切な金額を提示するのは技術の仕事だ．適切な投資さえあれば，21 世紀における新しい産業を立ち上げることができる．

そのためにも，規制でがんじがらめにするのではなく，最低でも官が民間の邪魔とならないような施策を実施しなくてはならない．あくまで事業者の自己責任を原則としつつも，製品の購入のような市場原理に基づいた支援を官が行うことが必要だろう．

オープンアーキテクチャーが軌道に乗れば，中小ベンチャー企業や従来の枠にとらわれない新規企業が宇宙産業に進出するだろう．そこから，新しい「ふじ」の使用法を提案するさまざまな拡張モジュールが出てくるようになれば，オープンアーキテクチャー戦略は完全に成功を収めたといえる．PC/AT 互換機のグラフィックスボードやサウンドボードのように，独自の市場が立ち上がるような，ユニークで革新的な拡張モジュールが出てくるかもしれない．宇宙産業は大きく成長し，市場のダイナミズムに従い，新たな市場が生み出されるようになる．

そうなれば，もはや「ふじ」規格を残して「ふじ」そのものは消滅しても構わない．あちこちでつくられるさまざまな機能のモジュールを買い集めて宇宙船として組み上げ，打ち上げることができる時代の到来である．

10・3　理想的宇宙船は「スーパーカブ」

宇宙開発をよく知るものほど，オープンアーキテクチャー構想に疑いの目を向けるだろう．

曰く「規格が公開されたからといって，すぐに宇宙船がつくれるほど宇宙技術は甘くない」

曰く「参入のためのコストが高いので，個人や小企業は参入でき

ないだろう」

曰く「有人宇宙飛行に必要とされる信頼性のレベルは，生半可なことでは実現できない」

曰く「そもそも，そんなに宇宙に行くことに需要が見込めるとは思わない」

――懐疑的な意見はいくらでも考えられる．

これらの意見に対しては，「やったことがないのに，なぜそう言えるのか」ということが最大の反論となるだろう．技術分野では，「できることがわかることが一番大切だ」といわれる．「できるかどうかわからない」ことをやるのは，目的地の見えない旅のようなものでとても大変だが，“できる”とわかっていれば，苦労は大幅に軽減される．「ふじ」構想で，最初の“できる”を提示できれば，後続の者は参入にあたって，さほどの障壁を感じないですむはずだ．

“できる”とわかって，さまざまな人々が参入してきたときには，当初の予想を越えたことが起きる．人間の行動力や発想の柔軟性を，自分を基準に考えてはいけない．ある程度以上の数の人が，有人宇宙船に興味をもって創意工夫をこらせる環境をつくれば，間違いなく事前の予想を越える技術革新が考案される．

有人宇宙船のような大規模な製品開発は，集団作業で行われる．一方，技術革新は常に独創的な個人が起こす．だから，少人数の集団が多数参入する方が，技術革新は起こりやすい．オープンアーキテクチャーによってさまざまな人や企業の参入を促すことは，同時に技術革新のチャンスをも増やすことになるだろう．そして，技術革新は，「有人宇宙船」というカテゴリーがもつ意味をも変化させることができる．

たとえば，往年の名車「ミニ」は技術革新だった．大型で豪華な乗用車が一般的だった時代に，「ミニ」はエンジンとトランスミッションを二段重ねにして前輪駆動を採用するというアイディアで，

「最小のボディーに最大の居住空間」を実現した.「ミニ」の出現で,その後の大衆車の設計は一新し,自動車という道具の使われ方すら変わった.

使われ方の終着点は,ホンダの二輪車「スーパーカブ」が理想といえるだろう.「スーパーカブ」には,目新しい革新的な技術は一切採用されていない.しかし,そのエンジンは丈夫で燃費がよく,パイプとプレス部品を組み合わせたフレームは低コストだ.そば屋の出前から日本一周のツーリングにまで使える用途の広さは,まさに「ふじ」構想が目指す理想の有人宇宙船そのものといえる.

「ふじ」のオープンアーキテクチャーを踏み台にして,“宇宙の「ミニ」”“宇宙の「スーパーカブ」”を実現するような,そんな技術者と技術革新を期待しているのだ.

有人宇宙開発に必要なのは,大きく豪華で高価な「ロールスロイス」ではない.「ミニ」であり「スーパーカブ」である.

第11章　われらの政府と宇宙に行くための投資システム

11・1　宇宙開発に吹き付ける逆風

本書の初版が出た2003年9月，日本には宇宙開発に関係する公的な組織が三つあった．宇宙開発事業団（NASDA），航空宇宙技術研究所（NAL），宇宙科学研究所（ISAS）だ．2001年8月に，2003年を目処に行政改革の一環として宇宙三機関を統合して，新たな独立行政法人とすることが決まり，2003年5月には新機関の名称が宇宙航空研究開発機構（JAXA）と発表された．2003年10月，統合なったJAXAは活動を開始した．

統合の理由は，肥大して赤字が恒常化している行政の効率化のためだった．しかし，今回の統合には，上部組織が統合したのだから実行機関も，という安易ともいえる理由も見え隠れしている．もっというなら，政治からの要求で「改革」の成果をみせなくてはならなくなった中央官庁の官僚が，統合した場合のアピール効果が大きく，族議員による反対が存在しない宇宙開発分野を狙い打ちにした感がある．少なくとも郵政事業や道路公団，さらには石油公団の改革において起きたような，政治をも巻き込んだ反対の動きは，宇宙三機関の統合では起きなかった．

この流れの中で起きたのは，「宇宙開発に対する，なし崩し的トーンダウン」とでもいうべき現象だった．

まず，それまで総理府内の内閣諮問機関だった宇宙開発委員会が，文部科学省の一委員会になった．それまで宇宙開発委員会は，文部省や科学技術庁に留まらず，通商産業省や郵政省，さらには警察庁

が運用する衛星通信に至るまで，日本が行う宇宙関連の政策と行政の両面をすべて審議して，内閣に直接意見を出すことができた．ところが，文部科学省の委員会となったことで，審議対象は文部科学省の担当分野に限定されることになった．

科学技術政策全般については，内閣府の総合科学技術会議が21世紀における長期ビジョンを策定することになったが，議論の叩き台となる重点8分野に選ばれたのは，ライフサイエンス，情報通信，環境，ナノテクノロジー・材料，エネルギー，製造技術，社会基盤，フロンティアであり，宇宙開発は入らなかった．宇宙開発は，海洋開発や地球環境監視などとともに，フロンティアの分野に吸収された．

つまり，宇宙開発は，日本という国の重点分野に項目が立たない程度の扱いとなったのである．

三機関統合については，宇宙開発委員会の中に設置された宇宙三機関統合準備会議が審議しているが，統合後の機関が重点的に開発すべき分野の候補に，日本独自の有人宇宙活動は入らなかった．宇宙開発委員会は，宇宙開発における選択と集中という方針を打ち出しており，今のところ，その選択の中には有人宇宙活動は入っていない．

その背景には，「有人宇宙活動には，過去に日本が経験したことがないほどのコストがかかるのではないか」という認識がある．1960年代の通貨水準で250億ドル（1ドル360円という当時の換算レートで9兆円）を費やしたアポロ計画や，完成までに3100億円，さらに運用のために年間700億円を必要とする国際宇宙ステーションの日本モジュール「きぼう」などの例が，その意見の根拠となるのだろう．今の日本の財政状況では，そのような高額のコストを費やす余裕がないし，またそれだけのお金を有人宇宙活動にかける理由をみつけることができないというのが，有人宇宙活動に懐疑的な

人の典型的な意見ではないだろうか．

ある官僚は，筆者に対して，「今後日本は，有史以来どのような社会も経験しなかった超高齢化社会に突入する．そのためには，高齢者に向けた社会資本やシステムの整備が必要だ．とすると，有人宇宙活動の必要性は低いのではないか」とコメントした．

11・2　宇宙に無関心な日本の政治家

ここまで話の流れでわかるように，現在の日本の宇宙開発の方向を実質的にコントロールしているのは，中央官庁の官僚である．それでは，日本の政治家は宇宙開発をどうみているのだろうか．

答えは「ほぼ無関心」．筆者がみる限り，国会にも内閣にも，宇宙開発をきちんと理解し，国家戦略として考えている政治家はいない．自由民主党の中には，若手議員を中心にした勉強会があるが，その知識レベルはまだまだ浅いといわなくてはならない．

日本の政治がもっとも宇宙開発に関心を示したのは，1960年代だった．国会では度々熱い議論が戦わされた．日本ロケット開発の父である糸川英夫氏は，佐藤栄作氏のブレーンを務めていたので，宇宙開発関係者から政治家への情報の流れもあった．

しかしその後，宇宙開発事業団が発足し，東京大学（後の宇宙科学研究所）との二本立て体制が確立すると，日本の政治家は宇宙に興味を失った．体制ができあがって，アメリカに対するキャッチアップ路線を走りだし，政治的判断を必要とすることがなくなったということもあったろうし，予算の額が小さく利権にならなかったということもあったろう．自民党の長期単独政権の中で，科学技術庁長官という職は，利権がほとんどない大臣1年生，あるいは大臣に一度なったら“上がり”の議員のための席として扱われてきた．このため，科学技術に対する基礎知識をもたない政治家が長官になることは日常茶飯事だった．政治の側は，宇宙開発委員会が上げてくる

計画に認め印を押している，という状態だったのである．

この傾向は，自民党が政権から滑り落ち，連立政権で与党に戻った今も続いている．2006年4月現在，小泉政権の前には財政再建や行政改革など難題が山積しており，宇宙開発のような小さな問題には気を配る余裕がないようにみえる．

11・3　宇宙開発を国家が行う三つの理由

第9章で述べたように，欧米各国は宇宙産業を手厚く支援している．国家にとって必要な産業だと判断しているからだ．必要だと考える理由は，おもに三つ．「国家の威信」「軍事的な意味」「産業の保有による経済的優位」である．

「国家の威信」が理由としては一番わかりやすい．宇宙開発は非常に目立つ．ロケットの打ち上げは，理屈抜きで「とてもすごいこと」と思わせるだけの派手さがある．その派手なロケットの先頭に人間が乗って，いかなる動物も行くことがなかった宇宙へ行くとなると，実現した国家のイメージは大きく向上する．実際，アポロ計画は，米ソが国家の威信をかけた競争をしなければ，10年以内という短い時間で人間を月に送り込むことはできなかったろう．

「軍事的な意味」は，宇宙空間の軍事的な価値から来ている．もちろん，大陸間弾道ミサイルの技術はロケットの技術とほとんど同じだというようなこともあるし，偵察衛星の利用価値も大きい．

だが，よりいっそう軍事面で意味があるのは，衛星通信や気象観測といった民生用途でも使われている技術だ．これらは，軍事作戦上も非常に大きな価値をもっているのである．気象衛星は，天気予報のために欠くことのできない道具だが，軍事作戦のために天気予報が非常に重要な役割を果たすことはすぐにわかるだろう．日本では，気象庁が「ひまわり」という愛称で気象衛星を運用していた(2003年5月に運用を停止)．一方，アメリカでは，気象庁に相当

するアメリカ海洋大気庁（NOAA）のほかに，アメリカ国防総省が「DMSP」という独立した気象衛星シリーズを運用している．

また，通信が軍事作戦の要であることはいうまでもない．アメリカをはじめとして世界各国の軍は，それぞれ専用の通信衛星を運用している．軍事上重要なインフラストラクチャーならば，他国からの輸入でまかなうのは安全保障上問題がある．たとえ商業的に成立しなくとも，国家が支援して，自国内に産業をもつ必要がある．

「産業の保有による経済的優位」というのは，民生分野での宇宙利用が社会インフラストラクチャーとして進んでいるということと関係する．通信衛星にせよ放送衛星にせよ，そして気象衛星も，社会の基本的な仕組みとして経済活動全般を支えるものとなっている．今や気象衛星の映像がない天気予報は考えられないだろうし，衛星放送は日本の津々浦々にまで普及している．消費者の目からはあまり見えないだろうが，さまざまな情報が通信衛星経由で世界を行き来している．アメリカでは1998年5月に，衛星通信会社のパンナムサット社が運用していた通信衛星「ギャラクシー4」が故障して，全米の通信が大きく乱れるという事件が起きた．とくに4500万ものユーザーが利用していたポケットベルは，じつに90％が影響を受けて使えなくなってしまった．我々の生活は，知らないうちにさまざまな宇宙技術によって支えられるようになっているのである．

このように，重要な社会インフラストラクチャーを自給できることは，他国からの政策的な干渉を受けないということにつながり，国の政策決定の幅を拡げる．逆に，インフラストラクチャーを海外に供給できるということは，外交面において優位に立つことを可能にする．

11・4　国家をあげて宇宙開発を推進する中国

これらの三つの意味をよく理解し，今急ピッチで宇宙開発を進め

ている国がある．中華人民共和国だ．

中国は，1992年頃から有人宇宙船の開発を開始し，1999年11月20日に甘粛省酒泉宇宙センターから最初の有人宇宙飛行の試験船「神舟1号」を打ち上げた．「神舟1号」は，地球を21時間周回した後，再突入カプセルが内モンゴル自治区中央部に着陸した．その後，2001年1月10日には「神舟2号」，2002年3月25日には「神舟3号」，2002年12月30日には「神舟4号」をそれぞれ無人で打ち上げ，着実に有人宇宙飛行への技術を蓄積している．「神舟2号」にはサル，イヌ，ウサギ，カタツムリが搭載された．「神舟3号」では，新型の宇宙服が搭載されてテストされた模様だ．

その上で2003年10月15日，楊利偉（ヤン・リーウェイ）宇宙飛行士を乗せた「神舟5号」を打ち上げ，中国は旧ソ連，アメリカに次ぐ第三の有人宇宙技術をもつ国となった．「神舟5号」は1日の飛行の後，地球に帰還した．2005年10月には2人の宇宙飛行士を乗せた「神舟6号」で5日間の飛行を行っている．次の「神舟7号」は2008年の打ち上げ予定だ．

「神舟」宇宙船は，ロシアの「ソユーズ」宇宙船の技術を導入し

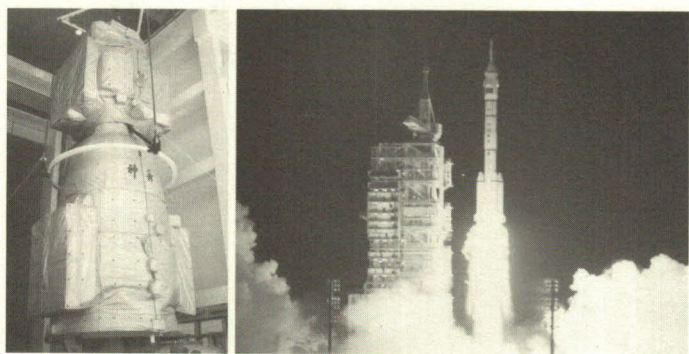



図11-1　中国の宇宙船「神舟」（写真提供：Aerospace Knowledge, China Pictorial/Xinhua/Taikonaut）

て開発しており，外見は「ソユーズ」に似ている（図11-1）．もっとも「ソユーズ」そのままなのは，豊富な運用実績をもつ再突入カプセルぐらいで，内部には中国独自の技術がかなりの部分使われているらしい．何よりも特徴的なのは，先端の軌道モジュールにも太陽電池パドルと姿勢制御機構が付いており，再突入カプセルが帰還した後も運用できるということだ．事実，「神舟2号」では，再突入カプセルの帰還後，軌道モジュールが約半年に渡って運用された．中国は有人宇宙ステーションに向けた技術を蓄積しているのである．

それだけではない．2001年10月10日付の「人民日報」で，中国は有人月探査計画をもっていることを公表した．2006年現在，2020年までに人間を月に送り込む予定らしい．

まだ噂の段階だが，地球をまわる軌道に70tのペイロードを打ち上げる能力をもつ巨大ロケットの開発を始めたという情報も聞こえてくるようになった．H-IIAロケットの7倍の大きさだ．このような巨大ロケットの用途は，今のところ有人宇宙ステーションの打ち上げか，有人月探査しか考えられない．噂レベルとはいえ，過去に中国から聞こえてきた噂レベルの情報は，かなりの部分が後で事実と確認されている．

有人以外の宇宙開発も，中国は熱心に進めている．

まず中国は，近年，気象衛星の開発をきわめて積極的に進めている．現在，東アジア地域の気象観測情報を提供しているのは，日本の「ひまわり」シリーズと，アメリカ海洋大気庁の「NOAA」シリーズだ（前述のように，設計寿命を越えて使われてきた「ひまわり5号」は2003年5月に運用を停止し，アメリカの気象衛星「GOES-9」が観測を引き継いでいる）．中国はそれに対抗するかのように，2008年までに，6基の気象衛星「風雲」を連続して打ち上げるとしている．直接の理由は，2008年の北京オリンピックに向けた気象観測態勢の整備だ．気象衛星がもたらす情報は，中国の人々

の生活の質を向上させることは間違いない.

さらに，2000 年 11 月に国務院情報局が公表した『中国の宇宙開発』という白書では，今後 10 年の重点目標として，「長期安定運用可能な地球観測システム」「独自運用する衛星放送と通信システム」に加えて「独自の衛星ナビゲーションおよび測位システム」が入っている．衛星ナビゲーション・システムの価値は，カーナビの普及をみても明らかだろう.

宇宙開発の推進が，中国に何をもたらすのかを考えてみよう.

まず，有人宇宙開発は中国に大きな威信をもたらすことは間違いない．過去に有人宇宙飛行を実現したのはアメリカと旧ソ連だけだ．中国が有人宇宙飛行を実現した 3 番目の国となるということは，中国の科学力や経済力が，欧州や日本を越えたことを非常にわかりやすく世界中にアピールすることになる.

同時に，国内政治の面でも有人宇宙飛行は大きな意味をもつ．多民族国家の中国にとって有人宇宙飛行は，国家の力，統合の象徴となるからだ．台湾も含めて「一つの中国」の統合主体としての実力をアピールできることは，中国にとって大きなメリットである.

外交カードとしての有人宇宙飛行ということも考えるべきだろう．中国人宇宙飛行士が，「神舟」宇宙船で国際宇宙ステーションへ訪問ということにでもなると，その対外的なアピール効果は絶大だといわなくてはならない．おそらく「アメリカと対等の中国」というイメージを国際的に強く印象づけることになるだろう．システムの熟成が進めば，旧ソ連のように周辺諸国の宇宙飛行士を受け入れるということも考えられる.

気象衛星や衛星ナビゲーション・システムについては，いうまでもないだろう．その開発を通じて中国の産業は，巨大かつ精密な社会システムの構築を行う能力を身につけることになる．宇宙産業が力をつければ，たとえば低価格の民生用衛星で世界市場に進出する

ことも可能になるはずだ．このようなシステムを中国が自国で生産／供給できるということは，アメリカや欧州に対する経済的な発言力を高めるだろう．

自国で気象衛星や衛星ナビゲーション・システムを開発することは，中国の軍事的なプレゼンスを強化することにもなる．気象衛星がもたらす情報は，たとえば周辺諸国と揉(も)めている南沙諸島周辺での中国の軍事作戦能力を向上させるだろう．衛星ナビゲーションについての軍事的な有用性はいうまでもない．

宇宙船「神舟」の命名者は，江沢民国家主席だった．このことは，中国の宇宙開発が国家のトップレベルの承認を受けて重点的に進められていることを意味する．中国首脳部は，宇宙開発，さらには有人宇宙開発の意味を熟知した上で計画を進めている．

11・5　日本国が投資した技術開発は死屍累々

それでは，日本も中国と同じように「国家の威信」を象徴する存在としての有人宇宙開発を実施するべきなのだろうか．

そうではないだろう．

第1章に書いたように，「ふじ」構想は，それ自身が目的ではない．目的は「スーパーマンでもお金持ちでもない，ごく普通の人が宇宙に出ていくことを可能にする」ということだ．国家の威信も，軍事的な意味も，産業の保有による経済的優位も，この目的に付随するもので，直接の目的ではない．

目的を混乱させてはならないし，手段と目的を混同してもいけない．国家威信の象徴を目指すのではなく，あくまで「誰にでも手が届く技術」を目指し，産業や生活の面から社会に浸透していくような開発を考えるべきなのである．最初から象徴を目指してしまったら，それは「誰にでも手が届く」ものにはならない可能性がある．なにしろ，象徴は手が届かない高嶺の花だからこそ象徴であるとい

う側面があるからだ．

さらに，ここで思い出さなければならないのは，「日本という国が直接投資した技術開発は，そのほとんどが失敗している」という事実だ．思いつくままに挙げるなら，原子力船「むつ」，高速増殖炉「もんじゅ」，1970年代のオイルショックに対応して始まった太陽エネルギー利用計画「サンシャイン計画」，推論可能なコンピューターを目指した「第五世代コンピュータ」，ソフトウェア開発の効率向上を目指した「シグマ計画」，国産旅客機「YS-11」，短距離離着陸実験機「飛鳥」――どれも税金を投入し，相応の時間と人的資源を消費し，そして結局，成果をきちんと社会に還元することはなかった．宇宙開発も他人事ではない．今，H-ⅡAロケットが，正念場に立っているといってよいだろう．

失敗も1回は仕方ない．しかし，これほどまでに積み重なった失敗から何も学ばないとしたら，それは怠慢というものだ．

これらの技術開発の経緯をみていくと，共通して浮かび上がってくる問題点は，「責任を誰も取らない無責任体制」であり，その結果の「意志決定の遅さ」である．つい最近，情報公開法が制定されるまでは，これに「隠蔽（いんぺい）体質」が加わっていた．

国の技術開発では，多くの場合，そのための組織が設立される．たとえば，原子力開発では動力炉・核燃料開発事業団が，「YS-11」では日本航空機製造が，「第五世代コンピュータ」では新世代コンピュータ技術開発機構（ICOT）がつくられた．

衆知を集めると称して新組織にさまざまな人材が結集するが，誰が責任を取るかは不明確なままだ．官僚は組織に天下りの指定席をつくるし，民間企業は組織内部で“厄介者”と判定された者を体よく押し込んだりする．結果，組織は弾力性を失い，目的をもって組織に集まった者もやる気を失う．手段と目的の混同が始まるが，状況の変化に対応する素早い方針転換はなされず，だらだらと毎年の

予算は支出されつづけ，民間企業は継続して契約を取り，利益を上げることにのみ専心する．時間と予算は消費され，最後に残るのは，よく読むとどうやらけっして“失敗”とは認めていないらしいとわかる報告書だけだ．

有人宇宙開発を，このような国の技術開発が示す悪しきパターンに委ねるべきではないだろう．国と民間の関係を根本的に考え直す必要がある．確かに民間は，採算が取れる見込みのない投資はできない．これから必要となるだろう分野に投資をするのは，税金を管理する国の役割である．しかし，これまでのやりかたで税金を有人宇宙開発に投入するならば，目的は手段にすり替わり，民間に成果が還元されないということになろう．

有人宇宙開発に限らず，日本で，民間投資ではなし得ない規模の技術開発を本気で成功させようとするならば，国家による，従来の予算による投資とは異なる形態の投資システムが必要になる．

11・6　江戸のパトロン精神を復興しよう

私見であるが，現在日本という国家に求められているのは，無私で鷹揚（おうよう），しかし厳しい審査の眼をもった“旦那”の精神ではないだろうか．別の言い方をすれば“パトロン”精神である．

江戸時代，文化文芸を支えたのは富裕層，つまり地域の顔役や江戸・大坂の大店の主人などの旦那衆だった．彼らは，自身の審美眼をもって俳人や画家を援助したり，歌舞伎役者や相撲取りを後援したりすることで，江戸文化を経済の面から支えた．歌舞伎，浮世絵，俳諧，文学，遊郭などの江戸文化，さらには和算のような科学に分類される技能すら，パトロンとしての旦那の存在があってはじめて成り立っていたのだ．

結果として，彼らは先端的な試みへの投資を行う仕組みとして機能していた．旦那とは，文化への理解ある鑑賞者であると同時に，

厳しい文句をつけたり新しい注文を発注したりするディレクターであり，時には浮世絵の出版人のようなプロデューサーでもある存在だった．このような存在が下支えすることで，はじめて江戸文化は華麗な成果を後の世に遺すことができたのである．

明治以降の日本では，このようなパトロンは消滅してしまい，代わって国家が社会の富を再配分する仕組みとして大きな役割を担うようになる．ただし国家は，投資の結果が「お国のために役立つ」ことを要求した．逆にいえば，官が「役に立つ」と理解できるところにしか投資は向かわなかった．だから，日本初の飛行機発明家である二宮忠八氏が，飛行機械への投資を陸軍に頼んでも，機械が空を飛ぶなどと信じられない陸軍は資金提供を拒む，というようなことが実際に起きた．

また「お国のために役立つ」という判断基準そのものも，「官僚のために役立つ」と矮(わい)小化されがちだ．新しい組織をつくり天下りポストを増やすというのは，その好例だろう．

これから 21 世紀を通じ，さらに 22 世紀へ向けて，日本が正しい方向への技術開発を進めるには，官民を問わず日本全体に“旦那衆の精神”を復興する仕組みが必要ではないだろうか．それは，社会の富を再分配する実質的な権限を，広く国民全体に取り戻し，我々一人ひとりが“旦那様”となれる仕組みをつくるということである．

インターネットのような情報通信システムの発達と経済の IT 化は，それを可能にするだろう．

筆者は，たとえば，税金の 1 割程度の使い道を納税者が指定するというような仕組みをつくり，その中でさまざまな国家事業を国民の審判にかけるということを，現実のシステムとして考えてもよい時期に来ていると考える．このようなシステムの中から，有人宇宙飛行を望む人が，自らの払う税金の使途を「有人宇宙飛行」と指定するわけだ．そもそも，国民から集めた税金の使い道を，専門知識

ももたず，選挙の洗礼を受けたわけでもない財務省の主計官が査定する現在の仕組みは，全国民の意志を税金の使途に反映する仕組みをつくれなかった時代の「やむを得ぬ妥協策」だったのだから．

もちろん，このようなシステムの実現にあたっては，鋭い目利きの能力をもった国民を育てていかなくてはならないことは言うまでもない．そして，政治家も官僚も，一人の国民として「無私で鷹揚，しかし厳しい審査の眼」をもち，職務を果たすべきなのである．

11・7　おわりに —一人ひとりにできること—

最後に，個人レベルでの，宇宙開発へのスタンスを考えよう．答えは簡単だ．行きたいものは宇宙に行く努力をする——行きたくないものは行く必要はない．お互い邪魔をしない．後は，社会的なリソースの適正な配分だけだ．

そのためには，迂遠（うえん）なようだが，声を上げつづけるしかない．

あなたは宇宙に行きたいと思うだろうか．それとも思わないだろうか．

思うのならば，機会がある度に，積極的に有人宇宙開発への賛意を表明していこう．官僚が行うパブリックコメントの募集には，積極的に自分の意見を送りつけよう．投票を通じて，政治に向かって意志を示していこう．国家予算を自分のところへくわえてきてくれる族議員ではなく，真に技術開発を理解する議員を選ぼう．民主主義国家に生きているのだから，与えられた権利を自分が宇宙に行くために行使しよう．

自分の頭で考え，自分の手足で行動しよう．

「ふじ」構想は，あなたが宇宙に行くための技術的回答の一つを提示している．実現には，何よりも本書を最後まで読み通したあなたの力が必要だ．

あとがき

宇宙開発事業団（現JAXA）の野田篤司さんから「宇宙船を造ろう」という題の電子メールが送られてきたのは2001年7月の初めだった．

思えば，なんて宇宙は遠くなってしまったのだろう．「アポロ11号」が月に行ったとき，小学生だった私は，大人になったら宇宙に行くのだと信じていた．スペースシャトルが初めて飛んだときも，「そうか，いずれこれに乗るのか」などと考えていた．ところが，20年以上も経ったのに，一向に宇宙に行けそうにもない．それどころか，どんどん遠ざかっているように思えるのは，どうしたことだろうか．

「世間なんてそんなものさ」とは思いたくはなかったが，さりとて自分に宇宙を近づける方策を思いつくわけでもなかった．あれこれ考えつづけ，それなりに行動を続けていた最中に届いたメールの題名が「宇宙船を造ろう」だったのだ．これに躍り上がらない奴は私の友達じゃない．このメールは，「つくることを教えてもらう」のでもなく，「誰かにつくってもらう」のでもなく，「自分たちの手でつくろう」と呼びかけていた．そうだ，自分たちでつくってしまえばよい．望んで行動しさえすれば，実現性はゼロではない．

「ふじ」は，アメリカや旧ソ連や欧州に教えてもらったものではない，自分たちの頭で考え，自分たちの手で模型を組み立てた結果だ．だから，本書を読み終わったなら，是非とも自分の頭で，「ふじ」構想の妥当性を考えてみてほしい．

検討では，この宇宙船にどんな人を乗せるかをずいぶんと議論した．なにしろ自分が乗りたいのだから，ガガーリンやジョン・グレ

ンやアームストロングではない，ごく普通の人を乗せることを可能にするというのが前提条件だった．野田さんが言った．

「釈由美子ちゃんなんか乗ってほしいなぁ．帰ってきてからニコニコ顔で『おもしろかったでーす』とか言ってくれれば最高だよねぇ！」．

この話を野田さんは，とある航空宇宙工学の大家にもしたという．すると大先生曰く「私は藤原紀香サンがいいなぁ」．

「ふじ」の第一歩は，そういう宇宙船をつくることでもある．

宇宙三機関統合を終えて，日本の宇宙開発の未来はますます不確定である．現状においては「ふじ」も，将来の宇宙計画に向けた一提案であり，開発にかかる前に越えなければならないハードルは多い．構想のまま潰(つい)えることだってあり得るだろう．

しかし，「ふじ」が夢に終わっても，我々は次なる有人宇宙船構想に取りかかるだろう．

本書の執筆にあたっては，「ふじ」構想提唱者の野田篤司氏をはじめ，あさりよしとお，江藤　巌，笹本祐一，鹿野　司，野尻抱介，林　譲治の諸氏からの資料提供や助言を得た．出版に際しては，ポピュラー・サイエンス編集委員の梅川荘吉先生，イラストレーターの小林伸光氏，撫荒武吉氏，田巻久雄氏，編集者の國分利幸氏の協力を賜った．ここに記して感謝の意を表したい．

青空を見上げてみれば，そこはそのまま宇宙へとつながっている．気が付けば誰もが宇宙の中に住んでいる．扉はいつだって存在している．

押すか押さないかは自分次第だ．

松浦晋也

有人宇宙開発に関する書籍

（啓蒙書的なものを中心に）

【宇宙開発全般】

『SPACE GUIDE 宇宙年鑑 2006』
アストロアーツ＆日本宇宙少年団 編（アストロアーツ）

『Newton 別冊シリーズ　宇宙への挑戦』（ニュートンプレス）

インターネットで情報が収集できるようになった今日，データ集としてはこの2冊を手元に置いておけば，ほとんどの用は足りる．

『日本の宇宙開発』 中野不二男 著（文春新書）

技術は社会や政治と無関係では存在し得ない．本書は，日本の宇宙開発が，国際情勢や国内の思惑などでどのように変化してきたかを初めて追跡したものだ．特にアメリカが対外的に宇宙技術をどのように利用してきたかは，宇宙開発に興味をもつ者ならば，基礎知識として押さえておきたい事項である．

『宇宙に取り憑かれた男たち』 的川泰宣 著（講談社＋α新書）

『ロケットの昨日・今日・明日』 的川泰宣 著（裳華房）

宇宙開発の歴史を概観したいならば，まずこの2冊を読もう．人間が太古から飽きることなく宇宙を夢想し，やがて技術を手に入れて本当に進出したのである．

『ロシアの宇宙開発の歴史 ―栄光と変貌―』 的川泰宣 著（東洋書店）

ロシアの宇宙開発は，アメリカやヨーロッパとまったく異なる体系を独力で構築したという点で学ぶべきことが多い．その技術体系は西側技術に慣れた目には異様にも思える．しかし，一貫した合理性があり，何より自ら失敗や錯誤を重ねつつ開発したものなので，大変強靱であり信頼できる．そのロシア宇宙開発を概観できる本．

『知りたい！なりたい！職業ガイド　宇宙にかかわる仕事』
ヴィットインターナショナル企画室 編（ほるぷ出版）

宇宙関係で働きたいと思う人はこの本を読もう．職業としての宇宙は，意外なほど多種多様である．

【宇宙飛行士関係】

『ぼくの仕事は宇宙飛行士』若田光一 著（東京書籍）

日本の宇宙飛行士が書いた本の中で，もっとも率直に「一つの職業としての宇宙飛行士」を描ききった本．宇宙飛行士は特別な人種ではなく，職業の一つなのである．

『宇宙よ（上下）』立花 隆・秋山豊寛 共著（文春文庫）

1990年12月に宇宙ステーション「ミール」に搭乗して日本人初の宇宙飛行士となった秋山氏に対して，立花氏が帰還直後の記憶鮮明な時期に行ったインタビューの記録．生々しい記述に満ちている．

『宇宙からの帰還』立花 隆 著（中公文庫）

宇宙飛行士が宇宙で何を感じたかを追求した古典的名著．今読むと，宇宙体験を宗教とか神秘体験に結びつけようとする著者の問題意識は奇妙に思えるが，1970年代に早くも宇宙体験に目を付けた功績は大きい．

『宇宙飛行士になるには』宇宙開発事業団 編著（ぺりかん社）

なりたいなら努力してみよう．そのための第一歩となる本．

『月面に立った男 ―ある宇宙飛行士の回想―』ジーン・サーナン 著（飛鳥新社）

『ザ・ライト・スタッフ ―七人の宇宙飛行士―』トム・ウルフ 著（中公文庫）

前者は，「アポロ17号」で月に向い，今のところ人類最後の足跡を月に印した宇宙飛行士の自伝．訥々とした語り口で，「アポロ」の頃の宇宙飛行士の日常がスケッチされている．後者は，「正しい資質（ライト・スタッフ）」という言葉を一般化させた，傑作ドキュメンタリー．アメリカ初の七人の宇宙飛行士と，彼らの選出母体であった軍のテストパイロットを描いたもの．

【宇宙輸送システム関係】

『月をめざした二人の科学者 ―アポロとスプートニクの軌跡―』
的川泰宣 著（中公新書）
月へ，そして火星へ！　フォン・ブラウンとセルゲイ・コロリョフ．政治体制が異なる二つの国で，お互い顔も知らずに同じ目標に向けて，あらん限りの力を振り絞った二人の先達を追ったノンフィクション．読んで泣くべし．男泣きに泣くべし．

『宇宙ロケットの世紀』 野田昌宏 著（NTT 出版）
『宇宙と天文 No.2　特集・世界のロケット最前線』
宇宙と天文編集部 編（誠文堂新光社）
ロケットの歴史は古くて長いが，宇宙への交通手段として認識されるようになったのは 19 世紀以降である．そんなロケットが，どんな歴史を経て現在どのようになっているかを概観するなら，この 2 冊がお薦め．

『宇宙へのパスポート ―ロケット打ち上げ取材日記 1999-2001―』
笹本祐一 著（朝日ソノラマ）
ロケット打ち上げに心奪われた著者が，種子島へフロリダへギアナへと，ロケットを追って世界中を駆け回った記録．日本は，自国でロケット打ち上げを見物できる世界の中でも幸運な国なのだ．さぁ，あなたも本書を参考に，ロケットの打ち上げを見に行こう．2003 年 10 月に続編『宇宙へのパスポート 2』が刊行された．筆者も解説を寄稿している．

『ロケット開発「失敗の条件」―技術と組織の未来像―』
五代富文・中野不二男 共著（ベスト新書）
ぎりぎりの動作条件に挑むロケット開発に失敗はつきものだが，その有り様が世間にきちんと認知されているとは言い難い．ロケット開発の実際を解説しつつ，失敗を「税金の無駄遣い」といたずらに非難するだけでなく，真に未来につなげるためにはどうしたらよいかを説いた本．圧巻は，付録の世界のロケット失敗年表である．

『人類、月に立つ（上下）』アンドルー・チェイキン 著（NHK 出版）
『アポロ 13 号奇跡の生還』ヘンリー・クーパー Jr. 著（新潮文庫）

12 人のアメリカ人を月に送り込んだアポロ計画．前者は，その全貌を描いた大部のノンフィクション．後者は，「輝かしき失敗」と言われた，「アポロ 13 号」の事故と乗組員の生還を迫真の描写で描いたドキュメンタリー．アポロ計画については，映画『アポロ 13』以降，関係者の回想録が次々にアメリカで出版されているので，そのうちに翻訳されるのを期待しよう．

『軌道エレベータ —宇宙へ架ける橋—』石原藤夫・金子隆一 共著（裳華房）
『新世紀未来科学』金子隆一 著（八幡書店）

未来には実現できるかもしれない科学技術についてまとめた本 2 冊．前者は，「究極の宇宙輸送システム」の軌道エレベーターを専門に扱った，おそらくは世界でも唯一の一般向け解説書．後者は，未来の科学技術全般を各トピックにつき数ページの解説で多数収録している．こういうものを「どうせできっこない」などと笑ってはいけない．これまでの歴史で人類は，大抵の思い描いていたものを科学と技術で実現してきているのだから．

「宇宙の傑作機 シリーズ」（風虎通信）

第 1 巻から順に**『ソユーズ宇宙船』『ジェミニ宇宙船』『ミール宇宙ステーション』『X-20 ダイナソア』『アリアン 4』『アリアン 5』『ヴォストーク宇宙船』『ヴォスホート宇宙船』**（以下続刊）．きわめて質の高い，宇宙機に関する小冊子．何よりも，この内容が日本語で読めるのがありがたい．個人出版なので一般の出版ルートで流通していない．ネット検索で同人誌ショップの通販を捜すか，年に 2 回開催されている巨大同人誌即売会コミケットで捜すしか入手方法がないのがつらいところ．ちなみに**『アリアン 4』**と**『アリアン 5』**を書いているのは筆者である．

『国産ロケットはなぜ墜ちるのか』松浦晋也 著（日経 BP 社）
『H-Ⅱロケット上昇 —国産大型ロケット開発 12 年の軌跡—』松浦晋也 著（日経 BP 社）

拙著も紹介しておく．前者は，正常な宇宙開発を妨げる要因を多角的に分析したもの．後者は，H-II開発の技術者等に取材を行い，大型国産ロケット開発の舞台裏を描いたノンフィクションだが，現在 品切れ中．図書館などで出会えたら読んで欲しい．

『スペースシャトルの落日 ―失われた24年間の真実―』 松浦晋也 著
(エクスナレッジ)

スペースシャトルが何を間違え，結果としてどのような害悪をもたらしたのかを分析した拙著．万能宇宙輸送システムを目指したスペースシャトルは，結局すべての用途に使いにくい乗り物になってしまった．なぜアメリカは，絶対安全・低コストと言いつつ，113回のフライトで2回も損失事故を起こすような安くもないシステムをつくり，使い続けたのか．その背後にある社会的・心理的な理由にまで踏み込んだ解説を試みた．

【宇宙ステーション関係】

『宇宙に暮らす ―宇宙旅行から長期滞在へ―』
松本信二 監修／清水建設（株）宇宙開発室 編（裳華房）
『宇宙で生きる』 新田慶治・木部勢至朗 共著（オーム社）
『重力ゼロの世界へ ―宇宙空間での飛行士たちの生活―』
ピーター・ボンド 著（ニュートンプレス）

この3冊は，「宇宙で暮らす」「宇宙で生きていくということはどういうことか」を解説したもの．前2冊は技術に重点が置かれており，後1冊は実際に宇宙飛行士たちはどのように暮らしているかをまとめている．

『有人宇宙基地・ミール』 大田憲司 著（新読書社）
『地球を離れた2年間 ―人類の夢、火星への挑戦―』
ワレリー・V・ポリャコフ 著（WAVE出版）
『ドラゴンフライ ―ミール宇宙ステーション・悪夢の真実―（上下）』
ブライアン・バロウ 著（筑摩書房）

1986年から2002年まで運用されたソビエト／ロシアの宇宙ステーション「ミール」は，さまざまな知見を人類にもたらした．最初の

1冊は，「サリュート」から「ミール」へというロシアの歴代宇宙ステーションを概観するのによい本．ただし出版年次が古く，運用後期の事故などには触れられていない．2冊目は，「ミール」で連続宇宙滞在記録をつくった著者による，「ミール」での生活の実際．当事者でなければ語れないリアルな宇宙生活が描かれている．最後は，おもにNASAの宇宙飛行士が滞在するようになった運用後期の，トラブルときしむ人間関係に焦点を当てたノンフィクション．ある者は野望を抱き，ある者は仕方なしに「ミール」に搭乗したが，そこで待っていたのは故障とトラブルが続く恐るべき状況だった．

【日本の小説・コミックス等】

「ロケットガール シリーズ」野尻抱介 著（富士見ファンタジア文庫）

著者は，科学的事実をきちんと押さえた上でエンターテインメントを展開する手腕において，現在日本随一といってよいSF作家．本シリーズでは，「体重が軽い」という理由だけで宇宙飛行士にさせられた女子高生たちの活躍を描く．特にシリーズ第3作『**私と月につきあって**』は，呉越同舟で月の極地探査に向かう日仏の女子高生たちのドタバタが，ラストで軌道力学に裏付けされた手に汗にぎる救出劇へと向かう，感動的な作品である．

「星のパイロット シリーズ」笹本祐一 著（ソノラマ文庫）

ちょっと未来，軌道上での有人サービスを行う小企業「スペース・プランニング」のお話．宇宙空間での物体の運動など，意地の悪い読者に徹するならツッコミどころは多い．しかし，底抜けの楽天性と技術と人類の未来へ寄せる信頼とは読んでいて快い．特にシリーズ第2作『**彗星狩り（上中下）**』はお薦めである．宇宙での一攫千金の競争が，なんと魅力的で素晴らしく描かれていることか．

『**第六大陸（1〜2）**』小川一水 著（ハヤカワ文庫JA）

現場取材から迫真の冒険SFを紡ぎ出す気鋭の著者による，月面基地開発物語．「人はなぜ宇宙に行くのか」ということに，小説の側から回答を出そうとする，若々しく力に満ちた小説だ．

『夏のロケット』川端裕人 著（文春文庫）

自分たちだけで有人ロケットをつくろうとする若者たちの物語．実際にできるできないはともかく，「国家に頼らない自分たちの宇宙開発」というコンセプトを，青春小説という形でわかりやすく提示した意味は大きい．

『なつのロケット』あさりよしとお 著（白泉社 Jets comics）

上記川端作品への著者なりの返歌として描かれたマンガ．大好きな学校の先生を救うために，小学生たちと初老の機械工場主が「ほんもののロケット」をつくろうとする．叙情的であり，同時にしっかりした数字の裏付けをもつハードな作品でもある．

『まんがサイエンス（I～IX）』あさりよしとお 著
（学習研究社ノーラコミックス DELUXE）

上記著者による学習マンガ．さまざまな科学・技術を，わかりやすく，かつ面白く教えてくれる．第2巻は「**ロケットの作り方おしえます**」．あなたが人の親であるならば，子どもに買い与えるべきシリーズ．

『HAL —Hyper Academic Laboratory—』あさりよしとお 著
（ワニブックス ガムコミックス(プラス)）

あなたが人の親であるならば，間違っても子どもに買い与えるべきではないシリーズ．「基本的に本当のことは書かれていない」という但し書きのもと，「信じちゃいけない嘘科学」が，著者一流のブラックユーモアとともに展開する．ところで，第2巻には「夢のSSTO」（SSTO：Single Stage to Orbit．単段式宇宙往還機）という話が載っているのだが，「基本的に嘘」ということは，たまには本当のことが…．

『プラネテス（1～4）』幸村　誠 著（講談社モーニング KC）

21世紀後半，衛星軌道のデブリを除去する仕事に就いた主人公ハチマキの日常を淡々と描いた SF マンガ．静かでさり気ない筆致の中から，「宇宙と向き合うということはどういうことか」「宇宙で生きるとはどういうことか」が心にしみるように描かれていく．

有人宇宙開発に関するWWWサイト

本文に出てくるものを中心にまとめた．
URLアドレスは2006年4月現在．

●宇宙航空研究開発機構（JAXA）
http://www.jaxa.jp/
※注　第11章でも触れたように，**宇宙開発事業団**（NASDA），**航空宇宙技術研究所**（NAL），**宇宙科学研究所**（ISAS）は2003年10月1日に統合され，独立行政法人 宇宙航空研究開発機構（JAXA）となった．

○**総合技術研究本部**
http://www.iat.jaxa.jp/

・**「日本独自の有人宇宙船構想」**
http://www.ista.jaxa.jp/aet/space/space-d15.html
本書の基礎となった報告書がそのまま掲載されている．できればこのオリジナルを自分で読んで，その妥当性について考えていただきたい．
（編集部注：2006年4月現在リンク切れ）

○**宇宙基幹システム本部**
http://www.sfo.jaxa.jp/

・有人宇宙技術（宇宙ステーション・きぼう広報・情報センター）
http://iss.sfo.jaxa.jp/

・輸送系プログラム
http://rocket.sfo.jaxa.jp/

○**宇宙利用推進本部**
http://www.satnavi.jaxa.jp/

○**宇宙科学研究本部**
http://www.isas.jaxa.jp/j/

○**宇宙情報センター**
http://spaceinfo.jaxa.jp/

●アメリカ航空宇宙局（NASA）

http://www.nasa.gov/

・有人宇宙飛行（Human Space Flight）

http://spaceflight.nasa.gov/

●ロシア宇宙庁（RSA）

http://www.rosaviakosmos.ru/

・ミッション・コントロール・センター

http://www.mcc.rsa.ru/

●欧州宇宙機関（ESA）

http://www.esa.int/

・有人宇宙飛行（Human Spaceflight and Exploration）

http://www.esa.int/esaHS/

●中国国家航天局（中国航天工業総公司）

http://www.cnsa.gov.cn/

●日本の宇宙開発関連団体

・文部科学省　宇宙開発委員会

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/uchuu/

・内閣府　総合科学技術会議

http://www8.cao.go.jp/cstp/

・日本航空宇宙学会（JSASS）

http://www.jsass.or.jp/

・日本航空宇宙工業会（SJAC）

http://www.sjac.or.jp/

・日本機械学会　宇宙工学部門

http://www.jsme.or.jp/sed/

サイト内には，宇宙工学に携わる大学・研究機関および宇宙工学関連会社に関する情報を提供する宇宙工学データベースが設けられている．

・宇宙作家クラブ（SAC）
http://www.sacj.org/
筆者も所属する任意団体．作家，マンガ家，イラストレーター，編集者，映像作家，音楽家等々が参加している．「何を創作するにしても，宇宙開発について正しい知識と理解をもった上でやろう」を目標に，宇宙開発現場の取材や関係者の話を聞く定例会などを行っている．
・日本宇宙少年団（YAC）
http://www.yac-j.or.jp/

●宇宙開発関連企業

・石川島播磨重工業株式会社 宇宙開発
http://www.ihi.co.jp/ihi/products/space/space.html
・三菱重工業株式会社 航空宇宙事業本部
http://www.mhi.co.jp/aero/
・ボーイング社（The Boeing Company）
http://www.boeing.com/
・ロッキード・マーチン社（Lockheed Martin Corporation）
http://www.lockheedmartin.com/
・オービタル・サイエンス社（Orbital Sciences Corporation）
http://www.orbital.com/
・アリアンスペース社（Arianespace）
http://www.arianespace.com/
・EADS（European Aeronautic Defence and Space Company）
http://www.eads.com/

●宇宙開発に向けた自発的な動き

最近になって，国家予算に頼らずに宇宙開発を進めることはできないか，という動きが世界のあちこちで出てくるようになった．年単位の予算は機動力に欠けるし，新しい発想を国家に理解させることは至難の業で，理解が得られたときにはタイミングを失している可能性が高いためである．その多くは，予算が少ないのできわめて小さなプロジェクトだ．しかし，どんなに小さな動きでも，自分がやりたいと考えて自分の頭を使い努力しているという点で，国家が運用する巨大プロジェクトに負けない大きな意味があるといえる．

・大学宇宙工学コンソーシアム（UNISEC）
　http://www.unisec.jp/
　　大学の研究室レベルで打ち上げられる 1～3 kg の衛星を研究・開発している．東京大学と東京工業大学の最初の衛星は，2003 年 6 月にロシアの「ロコット」ロケットで打ち上げられた．
・東大阪宇宙開発共同組合（SOHLA）
　http://www.sohla.com/
　　東大阪の町工場が共同で小型の衛星をつくろうと設立した組合．

アメリカでは，さまざまな宇宙ベンチャー企業が登場してはつぶれている．中には詐欺に近いものもあるが，その多くは真剣に，宇宙に行くことで収益を上げることを目指している．ここでは一番ゴールに近いと思える一社のみを紹介する．

・スケールド・コンポジット社（Scaled Composites）
　http://www.scaled.com/
　　弾道飛行による宇宙観光用機体を開発している．

※本書に掲載の図版をアレンジして，有人宇宙船「ふじ」オリジナル壁紙を作成しました．下記のサイトよりダウンロードして，パソコンのデスクトップの背景としてご利用ください．
http://www.shokabo.co.jp/author/8758/

索　　引

欧　字

ア

イ

ウ

エ

オ

カ

キ

ク，ケ

コ

サ

シ

ス

セ

ソ

タ

チ

ツ，テ

ト

ニ

ネ，ノ

ハ，ヒ

フ

ヘ，ホ

マ

ミ

ム，モ

ユ

ヨ

ラ，リ

ロ

著者略歴

松浦晋也（まつうら しんや）

1962年 東京都に生まれる．慶應義塾大学理工学部卒業，同大学大学院メディア・政策研究科修了．「日経エアロスペース」等の記者を経て，現在 科学技術ジャーナリスト，宇宙作家クラブ会員．主著に『H-IIロケット上昇』（日経BP社），『国産ロケットはなぜ墜ちるのか』（日経BP社），『スペースシャトルの落日』（エクスナレッジ），『恐るべき旅路』（朝日ソノラマ）がある．

新たな技術の開発において，特にどのタイミングでどこに一気に投資するかという判断は賭博に非常に似ている．確実な判断ができるまで待てばチャンスを逃す．他人に聞いてまわれば，まず判断を誤る．たった一人の個人の，命を削るほどの決断のみが，時として正しい道を示す．本書が現状の変革に一石を投じることを願ってやまない．

ブログ（松浦晋也のL/D） http://smatsu.air-nifty.com/

ポピュラー・サイエンス 258

われらの有人宇宙船 ―日本独自の宇宙輸送システム「ふじ」―

2003年 9月15日 第1版発行
2006年 5月15日 第4版発行

検印省略

定価はカバーに表示してあります．

著作者 松浦晋也
発行者 吉野達治
発行所 東京都千代田区四番町8番地
電話 (03)3262-9166（代）
郵便番号 102-0081
株式会社 裳華房
印刷所 横山印刷株式会社
製本所 板倉製本印刷株式会社

社団法人
自然科学書協会会員

ISBN 4-7853-8758-0

ポピュラー・サイエンス シリーズ

各四六判

最新 宇宙学 ―研究者たちの夢と戦い―

粟野諭美・福江　純 共編　　244頁／定価2100円

地上の大型望遠鏡群や宇宙に浮かぶ探査機，コンピュータとシミュレーション技術などの進歩・発達によって明らかになった最新の宇宙像をわかりやすく紹介する．

【主要目次】 Ⅰ **太陽系と宇宙人**　フレアの統一モデル／広大な宇宙に小さな惑星を探す －太陽系外惑星探し／これからのET探し　Ⅱ **星とブラックホール**　ブラックホールのミッシングリンク／星の調べを聴く／惑星系形成の始まり／できたての星の光の秘密　Ⅲ **宇宙と銀河**　銀河の一生／宇宙に漂う望遠鏡／まだまだあったX線天体／宇宙のリサイクルと銀河進化／宇宙の夜明け ―宇宙暗黒時代と銀河宇宙の誕生

ブラックホール天文学入門

嶺重　慎 著　　160頁／定価1680円

かつて純粋に理論上の産物であったブラックホールは，機器の発達などによって，観測にかかってくる現実の天体となってきた．ブラックホールの素顔から研究の将来展望までを解説する．

【主要目次】 ブラックホールを現実に引き込んだ天文学者たち／ブラックホールはどこにある／ブラックホールはなぜ明るく光るのか／ブラックホールからの高エネルギー放射／ブラックホール天体活動の秘密を暴け／底なしの穴から高速ジェットが噴出する／ブラックホールのルーツを探れ／ブラックホールをもっと深く理解したい

ＳＦ天文学入門（上） ―太陽系・星・ブラックホール―
ＳＦ天文学入門（下） ―ダークマター・宇宙論・地球―

福江　純 著

（上）194頁／定価1470円（下）226頁／定価1575円

小説やマンガ，アニメなどのＳＦを導入に，現代天文学の基礎から最先端の話題までをやさしく紹介する天文学の入門書．

上巻では，近未来の宇宙開発から，太陽系，星の誕生と終末，ブラックホール，降着円盤など，おもに銀河系内の話題を紹介．

下巻では，銀河中心の超巨大ブラックホールから，ダークマター，重力レンズ現象，宇宙ジェット，宇宙論などよりスケールの大きな話題と地球自身について解説する．

ISBN4-7853-8758-0

C0044 ¥1600E

定価（本体1600円+税）

SHOKABO